



Universidad
Carlos III de Madrid
www.uc3m.es

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

Análisis de la fractura de un componente del
fuselaje de un avión

Tutor: María Lourdes Rubio
Cotutor: Juan M. Pan
Alumno: Borja de Diego Restrepo

Fecha: 12/06/2013

Agradecimientos

En todos los objetivos que me he marcado en la vida he tenido que superar un sinfín de obstáculos y dificultades, pero siempre he tenido a personas que me han ayudado a levantarme en mis momentos de flaqueza. Este trabajo no ha sido distinto, por eso quiero agradecer a todas las personas que han formado parte de su desarrollo, pues gracias a ellos he logrado finalizarlo.

Gracias a aquellos que me impulsaron a seguir en este trabajo en los momentos en los que quería dejarlo, Gracias a los que me soportaron y pacientemente compartieron mi frustración cuando veía que no avanzaba. Gracias a esas personas que aun sin entender en lo que estaba trabajando me intentaron ayudar en la medida de sus posibilidades.

También quiero hacer una mención especial a mis tutores, María Lourdes Rubio, y Juan M. Pan, y compañeros, pues sin ellos no hubiese sido posible.

Por último este trabajo quiero agradecerse a esas dos personas que nunca me han dejado rendirme, y que pese a que hubo momentos en los que ellos tenían menos fe en mi que yo, nunca lo demostraron y me incitaron a seguir, ayudándome a ver la luz al final del túnel, y si ésta no existía se encargaban de ponerla para que yo la viese. Para ellos es la mención más especial en estos agradecimientos.

INDICE:

1	MOTIVACIONES Y OBJETIVOS	5
1.1	MOTIVACIONES	6
1.2	OBJETIVOS	7
2	MECÁNICA DE LA FRACTURA Y FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES	9
2.1	INTRODUCCIÓN	10
2.2	BALANCE DE ENERGÍA DE GRIFFITH	10
2.2.1	Modificación de la ecuación de Griffith	13
2.3	Factor de intensidad de tensiones	14
2.4	Métodos de obtención del factor de intensidad de tensiones	18
2.4.1	Métodos experimentales	18
2.4.2	Métodos numéricos	20
2.4.3	ABAQUS	20
2.4.4	Mallado y elementos de análisis en MFEL	21
2.4.5	Tipos de modelización de grietas:	22
2.4.6	XFEM (eXtended Finite Elments Method):	23
3	METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL PROBLEMA	27
3.1	Metodología	28
3.1.1	Método analítico	28
3.1.2	Método numérico:	34
3.2	Implementación de la subrutina para el cálculo del factor de intensidad de tensiones:	34
3.2.1	Datos de entrada:	35
3.2.2	Geometría de la placa:	36
3.2.3	Geometría de las grietas	39
3.2.4	Propiedades del material	41
3.2.5	STEP	41
3.2.6	Interactions	41
3.2.7	Cargas y condiciones de contorno	43
3.2.8	Mallado	44
3.2.9	Outputs	45
4	EJEMPLO DE APLICACIÓN Y RESULTADOS	47
4.1	Datos de entrada	48
4.1.1	Placa	48
4.1.2	Malla	48
4.1.3	Grieta de esquina	48
4.1.4	Grieta pasante	48
4.2	Método analítico	49
4.2.1	K_I con respecto a la profundidad de grieta pasante	51
4.2.2	K_I con respecto la profundidad de grieta de esquina	52
4.3	Método numérico:	55
4.3.1	K_I con respecto a la profundidad de grieta pasante	58
4.3.2	K_I con respecto la profundidad de grieta de esquina	60
5	CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS	65
5.1	Conclusiones	66
5.2	Trabajos futuros:	67
	BIBLIOGRAFÍA	69
	ANEXO	71

INDICE DE FIGURAS:

Figura 1 Agujero elíptico en placa infinita.....	11
Figura 2 Tensión de enlace en función de la distancia interatómica.....	12
Figura 3 Tensiones en el frente de grieta.....	14
Figura 4 MODO I de deformación de grieta (UNE 7540:1998).....	15
Figura 5 MODO II de deformación de grieta (UNE 7540:1998).....	15
Figura 6 MODO III de deformación de grieta (UNE 7540:1998).....	16
Figura 7 Probetas normalizadas.....	18
Figura 8 Colocación del extensómetro en el borde de la entalla.....	19
Figura 9 Elementos recomendados para el mallado.....	21
Figura 10 Malla de “Tela de Araña”.....	22
Figura 11 Ley de tensión-separación en fisuras cohesivas.....	23
Figura 12 Nodos originales y nodos dummies en elementos cercanos a la grieta.....	24
Figura 13 límites de integración para la función de Heavyside.....	25
Figura 14 Ecuaciones de desplazamiento y condiciones de contorno en el Frente de Grieta.....	25
Figura 15 Grieta pasante naciendo de un agujero.....	29
Figura 16 Dos grietas pasantes naciendo de un agujero.....	30
Figura 17 Grieta de esquina naciendo de un agujero.....	30
Figura 18 Dos grietas de esquina naciendo de un agujero.....	33
Figura 19 Grieta de esquina y grieta pasante naciendo de un agujero.....	34
Figura 20 Modelo general Figura 21 Zoom sobre el agujero.....	35
Figura 22 Esquema general de la placa con la división de los 8 sólidos.....	36
Figura 23 Placa 1 y 3.....	37
Figura 24 Placa2_izquierda.....	38
Figura 25 Placa2_derecha.....	39
Figura 26 Placa2_grieta de esquina.....	39
Figura 27 Grieta de esquina.....	40
Figura 28 Grieta pasante.....	40
Figura 29 Grieta de esquina Figura 30 Grieta pasante.....	42
Figura 31 Superficies de unión.....	43
Figura 32 Cargas y condiciones de contorno.....	43
Figura 33 Mallado del modelo y zonas de mallado.....	45
Figura 34 valores de K_I de la grieta pasante.....	51
Figura 35 valores de K_I de la grieta en esquina.....	52
Figura 36 valores de K_I de la grieta en esquina.....	53
Figura 37 valores de K_I de la grieta pasante.....	54
Figura 38 valores de K_I de la grieta pasante.....	58
Figura 39 Valores de K_I de la grieta en esquina.....	59
Figura 40 valores de K_I de la grieta en esquina.....	60
Figura 41 valores de K_I de la grieta pasante.....	61
Figura 42 Comparación de valores de K_I para distintas geometrías.....	62
Figura 43 Diagrama de tensiones en el modelo.....	63
Figura 44 Sección A-A'.....	63

1 MOTIVACIONES Y OBJETIVOS

1.1 MOTIVACIONES

A la hora de elegir este proyecto lo primero que me motivó fue la posibilidad de trabajar en elementos estructurales, pero lo que me terminó de convencer fue que los elementos a estudio se encontraban en una de las máquinas que más me han fascinado, los aviones.

El diseño de elementos mecánicos ha de tener en cuenta varios análisis: Tolerancia al daño, vida a fatiga, vida residual una vez aparecen grietas... Todos estos análisis se realizan ahora por los conocimientos adquiridos a lo largo de los años en el comportamiento de los distintos materiales.

En el comienzo de la ingeniería, el primer problema a la hora de diseñar algo era la imposibilidad del conformado de materiales. Una vez adquiridos los conocimientos para el conformado de algunos metales, el problema pasó a ser la dificultad de obtener estos materiales. Cuando esto ya no supuso un problema, la ingeniería se enfrentó a uno de los grandes retos de su historia. Este reto se planteó con el inicio de la revolución industrial, cuando los elementos estructurales pasaron a ser de metal, un material aparentemente mucho mejor a la hora de sufrir esfuerzos, pero en algunos casos los elementos se rompían sin previo aviso y sin haber modificado los esfuerzos a los que se sometían dichos objetos. Este reto fue un quebradero de cabeza tal que en la primera edición del tratado de la elasticidad de Love se dice que *“las condiciones de rotura de estos elementos son vagamente conocidas”* y como consecuencia los ingenieros sobredimensionaban las estructuras para conseguir factores de seguridad mayores de 10, en un intento de evitar estas roturas.

El primer estudio de fractura fue llevado a cabo por Leonardo da Vinci, pero sólo se obtuvieron resultados empíricos que no arrojaron mucha luz sobre el gran problema. En 1920 los primeros resultados cualitativos que relacionaban el tamaño de los defectos con la fractura de los elementos, fueron obtenidos por Griffith.

A partir de una serie de incidentes de colapso de los barcos Liberty en la segunda guerra mundial, se creó, en 1950, un grupo de científicos que empezaron a estudiar estos fallos estructurales inesperados. A partir de ese momento nace la MECÁNICA DE FRACTURA. Con el nacimiento de esta rama de la mecánica se descubre el concepto de “FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES” propuesto por G. R. IRWIN.

Este factor depende de las geometrías de las grietas. Hay dos tipos de grietas que aparecen sobre agujeros, las grietas de esquina y las grietas pasantes. Los factores de intensidad de tensiones (SIF) para estas grietas en geometrías comunes están tabulados, y tienen metodologías analíticas asociadas a cada tipo.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos que se persiguen en el Trabajo de Fin de Grado (TFG) son los siguientes:

- Desarrollar e implementar un programa en lenguaje de programación Python que permita obtener de forma automática el factor de intensidad de tensiones (SIF) en varias geometrías comunes de grieta pasante y grieta de esquina, en una placa finita, con un agujero (concentrador de tensiones) en la misma, sometida a tracción.
- Realizar un cálculo analítico de las mismas geometrías comunes, mediante una metodología mixta de los parámetros fijados por las metodologías de Newman-Raju, donde los parámetros de corrección serán tenidos en cuenta para la aparición de las dos grietas.

2 MECÁNICA DE LA FRACTURA Y FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES

2.1 INTRODUCCIÓN

Durante la mayor parte de la historia en la que se ha estudiado la mecánica de fractura, las leyes y metodologías usadas, sólo han sido aplicables a materiales elásticos, es decir, a aquellos que cumplían la ley de Hooke. Fue a partir de 1948 cuando se introdujeron efectos de plasticidad a pequeña escala.

A partir de 1960 se desarrollan teorías de mecánica de fractura en las que se tiene en cuenta comportamientos no lineales, como pueden ser la plasticidad a gran escala, la visco-plasticidad, o la visco-elasticidad. Todos estos nuevos resultados son extensiones de la mecánica de la fractura lineal. Al existir grietas en el modelo los factores de concentración de tensiones se disparan a valores demasiados altos haciendo que los resultados de tensión en el frente de la grieta no sean representativos, por lo que para estudiar la propagación de dicha grieta se ha de usar la mecánica de fractura lineal. A continuación se exponen las teorías que fundamentan la MFEL (Mecánica de Fractura Elástica Lineal), el concepto de tenacidad de fractura, y el factor de intensidad de tensiones, así como los métodos utilizados para obtener estos factores.

2.2 BALANCE DE ENERGÍA DE GRIFFITH

El primer principio de la Termodinámica expone, que cuando un sistema pasa de un estado de no equilibrio a un estado de equilibrio, se produce una disminución de energía.

El factor de concentración de tensiones fue estudiado por Inglis en una placa plana infinita con un agujero elíptico. A partir de la suposición de que el agujero no está influenciado por las condiciones de contorno de la placa, ($A \gg 2a$ y $H \gg b$) (Figura 1).

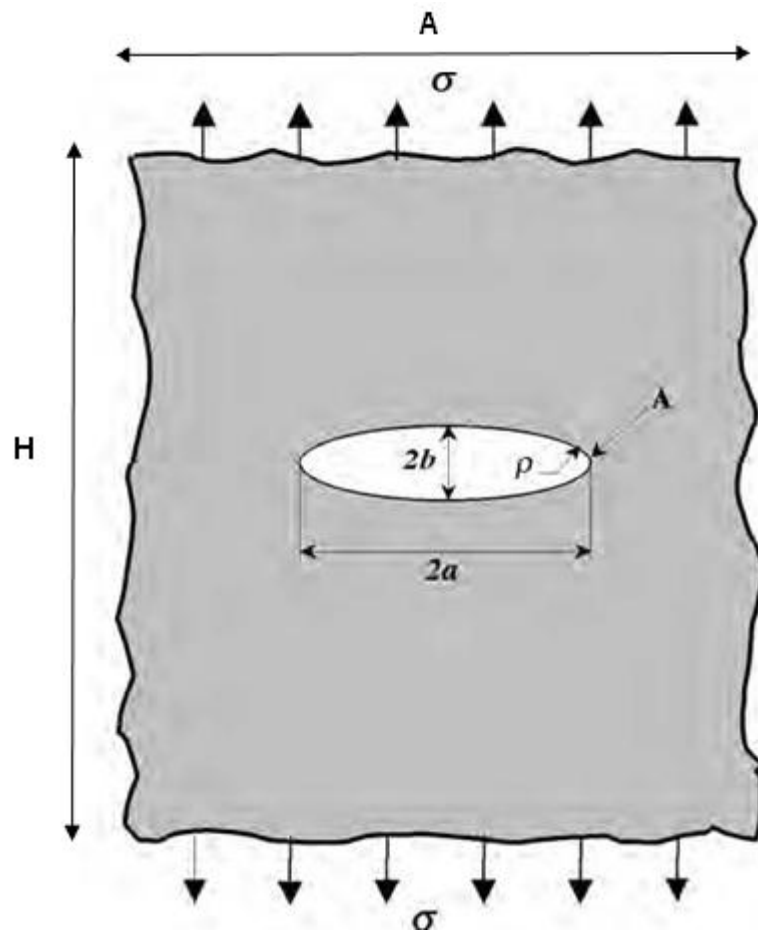


Figura 1 Agujero elíptico en placa infinita

Con las suposiciones realizadas se obtiene una relación conocida como el factor de concentración de tensiones (K_t), el cual es conocido ($K_t = 3$) para agujeros circulares. La ecuación que define este factor es:

$$\sigma_A = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \quad [1]$$

El problema que surge de este factor es que cuando el agujero elíptico el eje b tiende a 0 (frente de grieta aguda) se produce un valor de tensión infinito, y ningún material puede soportar tal tensión. Para evitar esta paradoja Griffith, basándose en el Primer Principio de la Termodinámica, postuló que *“Se puede formar una grieta (o una grieta existente puede crecer) solamente si el proceso origina una disminución de la energía total o esta permanece constante”*

Con este principio una grieta en un sólido sólo podrá crecer si la energía disponible para la propagación de la misma es igual o superior a la energía superficial del material. Es decir la grieta se propaga si el sistema es capaz de suministrar la energía necesaria.

La energía superficial “ γ ” se produce debido a que los átomos que se encuentran en la superficie de un sólido están en contacto con menos átomos que los que se encuentran en el interior de éste.

Los resultados obtenidos por Griffith son coherentes con trabajos a nivel atómico, en los que se obtienen resultados de rotura de enlaces interatómicos. La tensión del enlace interatómico se representa en la Figura 2.

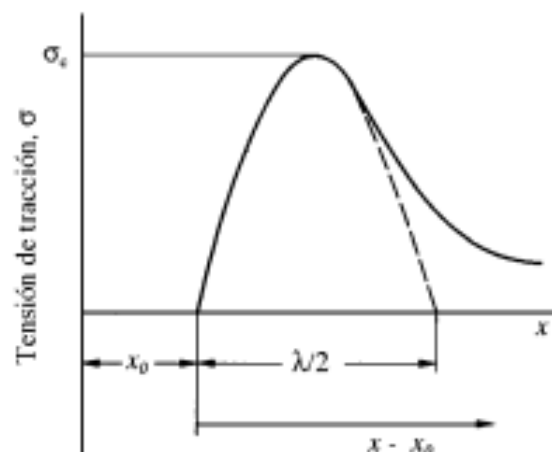


Figura 2 Tensión de enlace en función de la distancia interatómica

Se necesita una fuerza para aumentar la distancia entre átomos. Para que produzca una tensión crítica (σ_c), que rompa el enlace, la fuerza ha de ser mayor que la fuerza cohesiva del enlace.

Teniendo en cuenta que los elementos son de material elástico y por tanto los desplazamientos siguen la ley de Hooke, la expresión de la tensión crítica será:

$$\sigma_c = \frac{E\lambda}{2\pi x_o} \quad [2]$$

Con esta tensión crítica se obtiene la energía superficial, que se supone será la mitad de la de fractura, pues se crean dos superficies al romperse el material.

$$\gamma_s = \frac{\sigma_c^2 x_o}{E} \quad [3]$$

Si se hace tender a x_o el radio en el frente de grieta, y se aplica el factor de concentración de tensiones (K_t), la tensión de rotura tendrá la siguiente expresión:

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E \cdot \gamma_s}{a}} \quad [4]$$

2.2.1 Modificación de la ecuación de Griffith

La ecuación de Griffith es una condición necesaria, pero no suficiente para la propagación de grietas en todos los materiales. La concentración de tensiones en el frente de la grieta debe ser lo suficientemente alta para que supere la resistencia cohesiva del material, produciendo esto una plasticidad en la zona del frente de grieta. Además, en materiales dúctiles, la energía aparte de disiparse por la fractura de enlaces interatómicos, se disipa por las dislocaciones en la proximidad de la grieta.

La ecuación modificada queda de la siguiente forma:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E \cdot W_f}{\pi a}} \quad [5]$$

Donde W_f es la energía de fractura, en la cual se incluyen todas las energías que se producen en la propagación (superficial, plasticidad, viscoplasticidad....). Esta energía también puede verse modificada por el serpenteo o ramificación de las grietas.

2.3 Factor de intensidad de tensiones

En los primeros estudios de propagación de grietas se introdujo el término “Tenacidad de Fractura” el cual se define como la energía que se necesita para que la grieta se propague por unidad de área, y sus unidades son $[J/m^2]$.

Este factor está estrechamente relacionado con términos de propiedades elásticas y geométricas de la pieza que se analiza y el material del que está compuesta. La expresión de la tenacidad de fractura es:

$$R_{TF} = \frac{K^2}{E} \quad [6]$$

Donde E es el módulo de Young del material, y K es el factor de intensidad de tensiones, el cual se define a continuación.

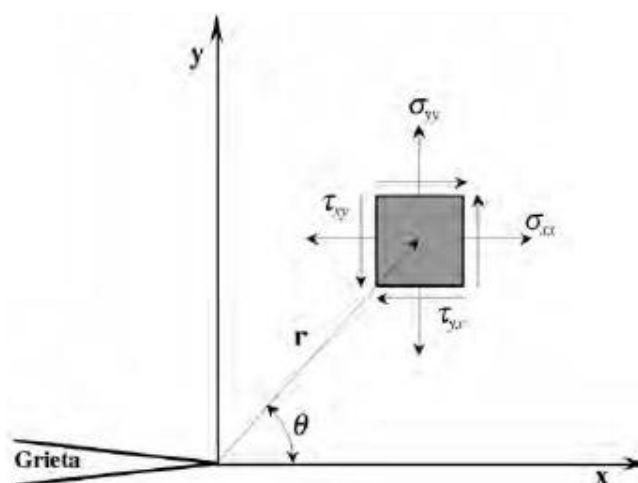


Figura 3 Tensiones en el frente de grieta

Analizando la Figura 3, en la que se presenta de manera esquemática un elemento cerca del frente de grieta de un material elástico, se puede hacer un análisis más preciso si pasamos de σ_A a coordenadas polares (r, Θ) , consiguiendo la siguiente expresión:

$$\sigma_{ij} = k\sigma \sqrt{\frac{a}{r}} \cdot f_2(\theta) \quad [7] \text{ (REF 5)}$$

Donde σ es la tensión, “a” la longitud de grieta y $f_2(\theta)$ una función de posición en función del ángulo θ

Con la expresión anterior se consigue que k sea un parámetro que depende de la geometría del problema.

Dentro de un sólido la grieta puede presentar estados de tensiones en tres modos distintos.

- MODO I: la tensión normal es perpendicular a la superficie definida por la grieta. Este modo es también conocido como modo de apertura. Se presenta en la Figura 4.

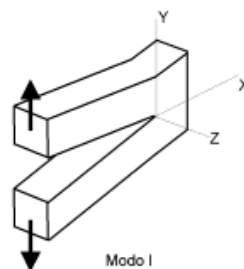


Figura 4 MODO I de deformación de grieta (UNE 7540:1998)

- MODO II: los desplazamientos de ambas superficies de la grieta son perpendiculares al plano de la grieta y el esfuerzo cortante es paralelo al mismo. También conocido como modo de deslizamiento. Se representa en la Figura 5.

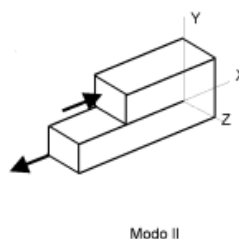


Figura 5 MODO II de deformación de grieta (UNE 7540:1998)

- **MODO III:** los desplazamientos de los labios de la grieta son paralelos al plano de grieta y su esfuerzo cortante es paralelo a estos. Se conoce como modo de desgarramiento y se ve en la Figura 6.

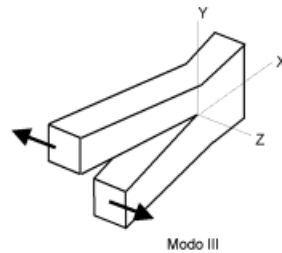


Figura 6 MODO III de deformación de grieta (UNE 7540:1998)

La resultante de la superposición de estos tres modos plantea el estado tensional general de un elemento en sólido.

El modo I es el más estudiado porque es el que se produce con más frecuencia. El Modo II se suele producir en grietas que están sobre planos a 90°. El modo III aparece cuando se aplica torsión sobre barras en las que existen grietas.

Con los estudios de un mismo campo de tensiones en los tres modos distintos, sobre una grieta pasante en una placa infinita, obtenemos:

- MODO I

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 - \frac{\sin\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right] \quad [8]$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[1 + \frac{\sin\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2}\right] \quad [9]$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \quad [10]$$

- MODO II

$$\sigma_x = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left(-\sin \frac{\theta}{2} \right) \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad [11]$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad [12]$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad [13]$$

- MODO III

$$\sigma_{xz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \left(-\sin \frac{\theta}{2} \right) \quad [14]$$

$$\sigma_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad [15]$$

Estas expresiones tienen en común un factor K que depende del modo que presenten las tensiones. Debido a esto se puede afirmar que K (factor de intensidad de tensiones) es un factor que caracteriza completamente las condiciones tensionales y de deformación presentes en el frente de grieta de un material elástico lineal.

Las expresiones obtenidas son para placas infinitas, pero tras varios análisis, se demuestra que se pueden aplicar de manera genérica a otras geometrías si se obtienen los valores de K en esas geometrías.

2.4 Métodos de obtención del factor de intensidad de tensiones

Dentro de este apartado se exponen los métodos más usados en la obtención de K_I en elementos estructurales con estados de tensión estática.

2.4.1 Métodos experimentales

En la actualidad se ha adoptado la norma americana ATSM E399 para el estudio de la caracterización del factor de intensidad de tensiones.

La metodología descrita por la ATSM E399 sugiere el estudio de este factor en probetas de flexión o probetas compactas sometidas a tracción. Las probetas usadas han de tener una grieta lo más perfecta posible y con unas dimensiones nominales $B=a=W/2$. Esta grieta se genera sometiendo a procesos de fatiga la probeta a estudio. Para tener la seguridad de que la grieta se produce en la zona requerida se realiza una entalla por mecanizado, antes de someter la probeta a fatiga.

En la se muestra un esquema de los dos tipos de probetas.

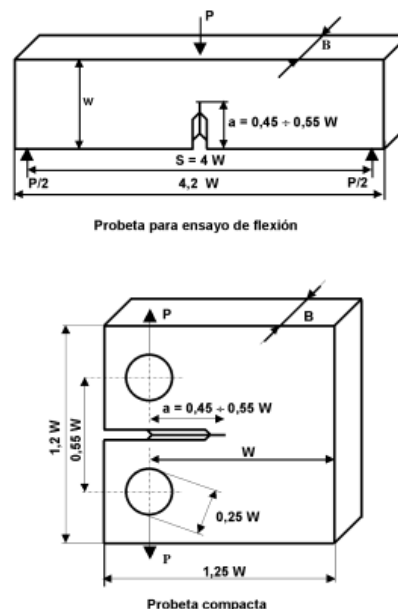


Figura 7 Probetas normalizadas

Durante todo el ensayo se tiene que tener un registro exhaustivo, tanto de la carga, como de la abertura de la entalla, pues a partir de la carga crítica, con la cual se puede ver un crecimiento significativo de la grieta, se obtiene el K_{Ic} (factor de tensiones crítico).

Una vez que se tiene la probeta preparada para su estudio, la ASTM E399 especifica unos márgenes de velocidad dentro de los cuales se ha de realizar el ensayo, para que la medida obtenida sea de un caso estático. Este margen acota que la velocidad de aumento del factor de tensiones sea entre 0.5 y 2.75 MPa m^{1/2} s⁻¹. La norma también contempla la posibilidad de maquinas de estudio cuya velocidad sea constante, para lo cual establece una gama de velocidades admisibles en las que los ensayos son válidos. Esta gama puede obtenerse a partir de la expresión:

$$C = \frac{u_p}{P} = \frac{33.64}{E B} \quad [16]$$

Se ha de tener en cuenta que esta expresión es válida para probetas normalizadas en las que $a/W = 0.5$.

En este tipo de metodología la medida del crecimiento de la grieta se mide mediante la colocación de un extensómetro muy preciso en el mismo borde de la entalla. En la Figura 8 se presenta un esquema la colocación de éste.

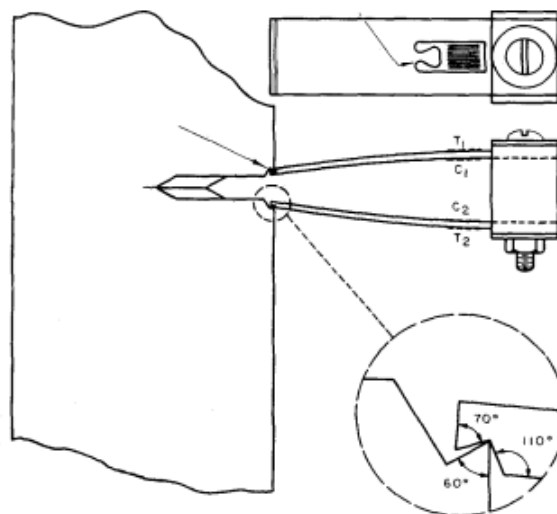


Figura 8 Colocación del extensómetro en el borde de la entalla

2.4.2 Métodos numéricos

Una alternativa muy extendida para la obtención del factor de intensidad de tensiones, es el estudio mediante los elementos finitos. Este es el método numérico más generalizado y consiste en la simulación virtual de ensayos, en los cuales se modela la probeta a estudio con las fisuras existentes sobre la misma y las cargas a las que se va a someter. Una gran ventaja de este tipo de estudio es que no tiene que modelarse una probeta estándar, sino que, si es conocido el objeto y la posición y dimensión de la grieta, éste se puede modelar con gran exactitud y obtener directamente los valores aplicados a la geometría específica. Este estudio es de gran interés pues como se ha mencionado en apartados anteriores, el factor de intensidad de tensiones se ve influenciado por la geometría.

La forma de obtener el K_I en un modelo de elementos finitos es mediante la evaluación de los desplazamientos de los nodos que se encuentran en el entorno del frente de grieta. El hecho de que se mida de esta manera, implica que cuantos más nodos existan en el entorno de la grieta, más preciso será el cálculo. Para cálculos de alta precisión se necesitan muchos elementos y esto aumenta la carga de trabajo en la máquina en la que se realice el estudio.

Otra forma de analizar este factor dentro de un modelo FEM, es calcularlo de manera indirecta, con métodos energéticos como la integral J de dominio. El problema de este segundo modo de estudio es que si se aplican casos de carga combinados, no se pueden calcular los K a modo I, II y III. Para ello se necesita descomponer las tensiones en componentes simétricas y antisimétricas.

Pese a ser muy utilizados, estos métodos tienen ciertas limitaciones porque utilizan como hipótesis que el material es perfecto, es decir, que no existen cavidades, microfisuras... Debido a esto, los análisis experimentales no se pueden reemplazar.

2.4.3 ABAQUS

Se trata de un programa destinado a la resolución de problemas ingenieriles. Está basado en el método de elementos finitos. Esta potente herramienta de cálculo resuelve desde simples análisis estáticos, hasta complejas simulaciones de aplicación de fuerzas dinámicas. Gracias a su amplia librería se puede simular cualquier modelo de elementos finitos, con un sinfín de geometrías. También permite incluir las propiedades de cualquier material, lo que permite que esta herramienta se use en casi todas las áreas de la ingeniería.

Este programa fue desarrollado en 1978 por la prestigiosa compañía Dassault Systèmes, y en su entorno incorpora cuatro productos básicos:

- Abaqus/CAE: esta aplicación se usa para modelar, analizar y visualizar el comportamiento de componentes mecánicos, y ensamblaje de varios componentes. Dentro de este producto existe un módulo de post proceso donde se presentan los resultados de los análisis realizados. (Producto usado en la realización del proyecto)
- Abaqus/CFD: herramienta de cálculo de dinámica de fluidos.
- Abaqus/Standard: herramienta de análisis general de Abaqus, usa el sistema de integración implícita.
- Abaqus/Explicit: herramienta de análisis especial que usa el sistema de integración explícita. Se usa cuando los modelos introducen no linealidades.

La programación de todos estos productos se realiza mediante código abierto en lenguaje Python, lo que permite realizar *scripts* o subrutina, como el que se realiza en este proyecto.

2.4.4 Mallado y elementos de análisis en MFEL

Como ya se menciona anteriormente la presencia de muchos nodos cerca del frente de grieta, es un factor deseable, pues nos da un análisis más sensible y preciso. Pero no todos los elementos de mallado son válidos. En el caso del MEFL los más recomendables son los prismas o rectángulos de nueve nodos en las zonas más alejadas de la grieta. En la zona más próxima al frente de grieta, los elementos pasan a ser triangulares o tetraédricos para facilitar las transiciones entre zonas. Estos elementos aparecen reflejados esquemáticamente en la Figura 9.

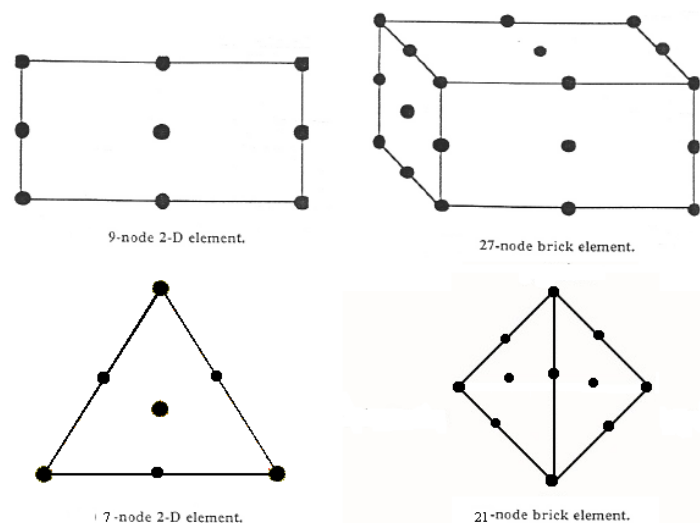


Figura 9 Elementos recomendados para el mallado

El problema que surge al usar estos elementos es que existe la posibilidad de que aparezcan singularidades, cosa que no es deseable en la mayoría de los análisis pero, para análisis de fractura son deseables, ya que pueden mostrar tensiones infinitas en el frente de la grieta,

Sabiendo que estos elementos son los más eficaces en el estudio de MFEL. El mallado más efectivo es el denominado Tela de Araña, (Figura 10), que incluye tanto elementos prismáticos de 9 nodos como elementos triangulares de 7. Para asegurar la eficiencia deseable de esta malla es recomendable el uso de 20 nodos como mínimo en las líneas radiales, ya que al producirse gran plasticidad en el frente de grieta, aparecen bandas de deslizamiento con gran valor de deformación plástica.

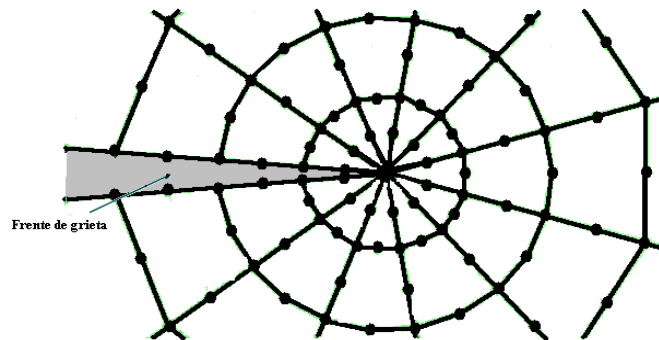


Figura 10 Malla de “Tela de Araña”.

2.4.5 Tipos de modelización de grietas:

- Fisura cohesiva: en las herramientas de cálculo de elementos finitos es la manera más utilizada para modelizar la grieta. Para llevar a cabo este tipo de fisura se requiere de una relación constitutiva, que tiene forma de ley, la cual relaciona la tensión transmitida por la fisura con la separación que se produce en la misma. La grafica representada por esta ley aparece en la Figura 11. Observando esta ley se pude apreciar gran similitud con la de la Figura 2, ya que en ésta se presenta la tensión del enlace interatómico.

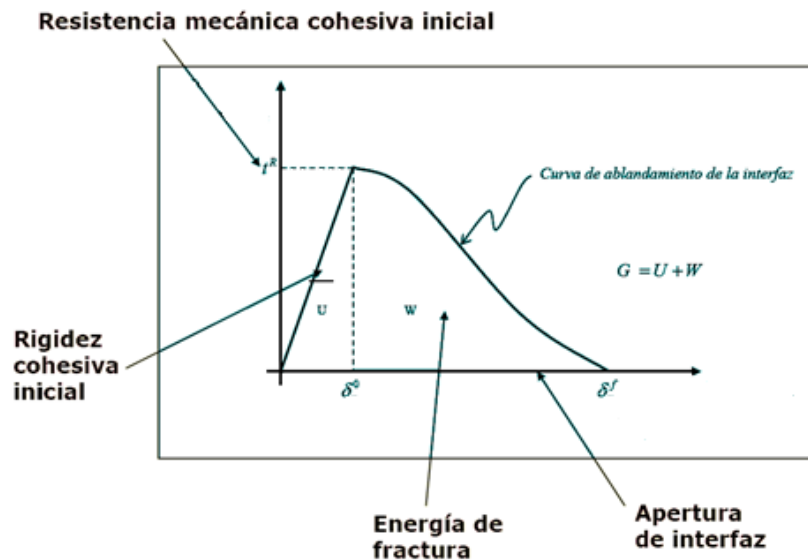


Figura 11 Ley de tensión-separación en fisuras cohesivas

Dentro de la ley de tensión separación se pueden apreciar la resistencia cohesiva inicial que es el punto de tensión máxima que puede recibir el modelo antes de que se empiecen a producir daños en el mismo. Hasta llegar a este punto se observa que el comportamiento es lineal, el cual coincide con un comportamiento elástico. En esta zona si se tiene una rigidez demasiado alta pueden aparecer errores en el programa, ya que pueden surgir problemas de convergencia en el estado tensional.

La forma de la curva de ablandamiento está completamente definida por la función de daño apertura. Constituye uno de los parámetros cohesivos a definir.

- XFEM: debido a que es el método que se usará en el estudio que se realiza en el trabajo se explica más en detalle a continuación.

2.4.6 XFEM (eXtended Finite Elements Method):

El método de modelización XFEM, es una ampliación del método tradicional de elementos finitos (FEM). En FEM, el estudio y modelización de fractura sólo permite la propagación de una grieta si los elementos por los que se va a propagar han sido predefinidos para contener a la misma. Esto presenta un gran problema de eficiencia a la hora de realizar análisis, pues no siempre se pueden realizar ensayos experimentales para conocer las zonas donde se producirán las fisuras

Por el contrario, en el módulo XFEM, la localización de la grieta es independiente del mallado, por lo que no se necesita realizar mallados especiales como la descrita en la Figura 9, y se evita el tener que remallar cada vez que la grieta aumente de tamaño. Esto se debe a que en el módulo XFEM se generan unos nodos *dummies* cada vez que se produce separación en la grieta.

Otra ventaja de este módulo es que tiene la capacidad de calcular la capacidad de carga que soporta una estructura agrietada, y de dar resultados para el tratamiento de la misma. Los encargados de este análisis son los nodos especiales (*dummies*) que se generan en XFEM. Una característica esencial de estos nodos es que el método de integración que se aplica a los mismos anula la tensión en ellos y la distribuye por los nodos adyacentes.

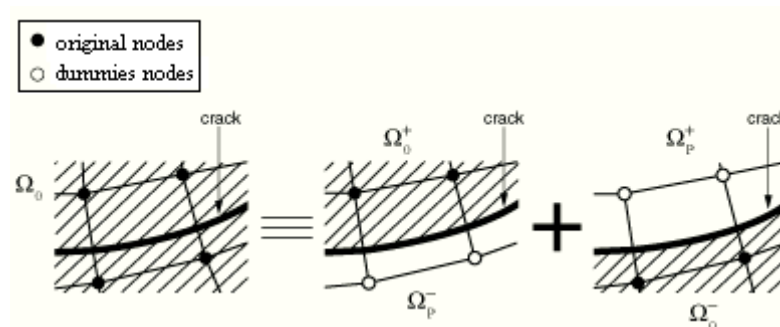
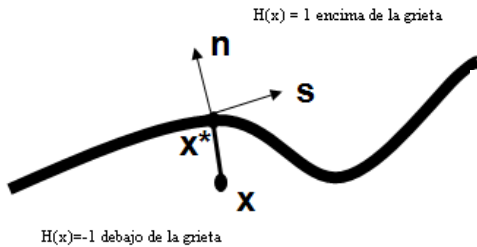


Figura 12 Nodos originales y nodos dummies en elementos cercanos a la grieta

Además de la creación de nodos auxiliares, la principal diferencia entre los módulos FEM y XFEM, es su formulación, pues el segundo incorpora a la función polinómica usada por el FEM, dos términos extra. Estos son:

2.4.6.1 Función de 'Heaviside',

Representa el incremento de los desplazamientos en las superficies de la grieta. Esta función está acotada por el rango $[-1,1]$ en función del lado de la fisura en la que se encuentre el punto de integración.



$$H(x) = \begin{cases} 1 & \text{SI } (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \cdot \mathbf{n} \geq 0 \\ -1 & (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \cdot \mathbf{n} < 0 \end{cases}$$

[17]

Figura 13 límites de integración para la función de Heavyside

Donde:

- \mathbf{x} es el punto de integración aleatorio,
- \mathbf{x}^* el punto más cercano a \mathbf{x} perteneciente a la grieta
- \mathbf{n} un vector unitario y normal a \mathbf{x}^* .

2.4.6.2 Función de Frente de grieta:

Esta función modela la singularidad del frente de grieta. Para ello implementa funciones de desplazamiento básicas en los nodos que están presentes en el frente de la misma.

$$[F_\alpha(x), \alpha = 1-4] = [\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2}]$$

[18]



Figura 14 Ecuaciones de desplazamiento y condiciones de contorno en el Frente de Grieta

Los nuevos términos indicados anteriormente se aplican sobre los elementos adyacentes a la grieta. Si estos elementos han sido divididos por la grieta, automáticamente “la función de heaviside” genera nodos *dummies* para conseguir la continuidad de la malla y el elemento pasa a dividirse en dos, pero con la condición de que en los nodos generados no incluyen la “función de frente de grieta”.

En la Ecuación 19 se presenta la ecuación general de XFEM

$$u^h(x) = \sum_{I \in N} N_I(x) \left[u_I + \underbrace{H(x)a_I}_{\substack{\text{FUNCIÓN DE HEAVISIDE} \\ I \in N_T}} + \underbrace{\sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_I^{\alpha}}_{\substack{\text{FUNCIÓN DE FRENTE DE GRIETA} \\ I \in N_A}} \right]$$

Ecuación 19 Función del módulo XFEM

Donde

- $N_I(x)$ es la función de forma
- $H(x)$ es la función de Heaviside
- $F_{\alpha}(x)b_I^{\alpha}$ es la función de frente de grieta

Este método, pese a agilizar cálculos iterativos, también tiene limitaciones. Las más importantes son:

- Sólo puede usar elementos lineales
- No modela propagaciones de grietas en fatiga
- No puede analizar dos o más grietas sobre una geometría, necesita de la división de esta en distintos CELLS. Debido a esto un único elemento no puede ser atravesado por más de una grieta.
- No es compatible con contactos, salvo que éstos estén definidos como *frictionless*.
- Las grietas no pueden ramificarse y tampoco pueden cambiar de dirección en un ángulo mayor de 90° en un solo incremento

3 METODOLOGÍA Y DESARROLLO DEL PROBLEMA

3.1 Metodología

En este proyecto se va a hacer un estudio comparativo entre los valores de los factores de intensidad de tensiones obtenidos por métodos numéricos y métodos analíticos.

En los siguientes apartados se explica la metodología seguida en el estudio analítico así como la implementación del método XFEM en el programa que se ha desarrollado para el estudio por métodos numéricos.

3.1.1 Método analítico

Para este apartado se ha usado la metodología propuesta en AFWAL-TR-86-3003 “Assessment of Damage Tolerance Requirements and Analyses” En el capítulo tres del mencionado documento está descrita la metodología que se presenta a continuación.

El cálculo analítico del SIF (Stress Intensity Factor) es muy complejo si se aplican las condiciones prácticas. Para salvar este hecho se aplica un método por el cual se obtienen resultados a partir de la superposición de estados auxiliares apropiados. Estos estados auxiliares están caracterizados por sus configuraciones simples.

Este documento plantea diferentes configuraciones auxiliares, y para cada una de ellas dos posibles estados de carga. Para el estudio que se propone sólo se usarán los casos en los que se aplica una tensión uniforme y remota.

A continuación se describen las configuraciones auxiliares utilizadas:

3.1.1.1 Grieta pasante naciendo en un agujero

Esta configuración simple fue estudiada por primera vez por Bowie, y posteriormente Tweed y Rooke mejoraron la metodología. Los resultados obtenidos para ésta siguen la siguiente ley:

$$CR_{H01} = \frac{K}{\sigma\sqrt{\pi a}} = \exp \left[1.2133 - 2.205 \left(\frac{a}{a+R} \right) + 0.6451 \left(\frac{a}{a+R} \right)^2 \right] \quad [20]$$

Donde

- $a \rightarrow$ longitud de la grieta
- $R \rightarrow$ Radio del agujero
- $\sigma \rightarrow$ Tensión aplicada
- $K \rightarrow$ Factor de intensidad de tensiones (SIF)

En la Figura 15 se muestra un esquema de la configuración

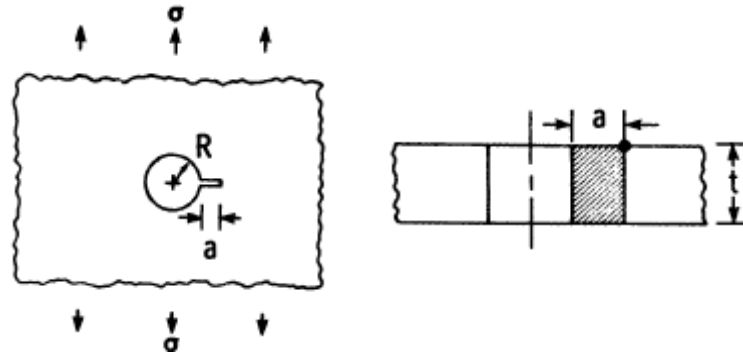


Figura 15 Grieta pasante naciendo de un agujero

3.1.1.2 Dos grietas pasantes naciendo de un agujero

Esta configuración también fue resuelta por Tweed y Rooke. La ley tiene diferencias si las grietas son iguales o con profundidades distintas

3.1.1.2.1 Grietas con distinta longitud característica

$$CR_{Ho2} = \frac{K}{\sigma\sqrt{\pi a_1}} = CR_{Ho1} \cdot F_1 \quad \text{para} \quad \frac{a_1}{R} < 5 \quad \text{y} \quad \frac{a_2}{R} < 5 \quad [21]$$

$$F_1 = RK0 + RK1\left(\frac{a_1}{R}\right) + RK2\left(\frac{a_2}{R}\right) \quad F_1 = RK0 + RK1\left(\frac{a_1}{R}\right) + RK2\left(\frac{a_2}{R}\right) \quad [22]$$

$$RK0 = 0.993522 + 0.157907\left(\frac{a_2}{R}\right) - 0.00579398\left(\frac{a_2}{R}\right)^2 \quad [23]$$

$$RK1 = 0.0457513 + 0.032251927\left(\frac{a_2}{R}\right) - 0.00517178\left(\frac{a_2}{R}\right)^2 - 0.000408155\left(\frac{a_2}{R}\right)^3 \quad [24]$$

$$RK2 = -0.00031020177 + 0.001974207\left(\frac{a_2}{R}\right) - 0.0005974349\left(\frac{a_2}{R}\right)^2 + 0.00005767606\left(\frac{a_2}{R}\right)^3 \quad [25]$$

3.1.1.2.2 Grietas con la misma longitud característica

$$CR_{Ho2} = \frac{K}{\sigma\sqrt{\pi a_1}} = \exp\left[1.21009 - 2.1114\left(\frac{a_1}{a_1 + R}\right) + 0.92466\left(\frac{a_1}{a_1 + R}\right)^2\right] \quad \text{para} \quad a_1 = a_2 \quad [26]$$

Donde

- $a_i \rightarrow$ longitud de la grieta
- $R \rightarrow$ Radio del agujero
- $\sigma \rightarrow$ Tensión aplicada
- $K \rightarrow$ Factor de intensidad de tensiones (SIF)

En la Figura 16 se muestra un esquema de la configuración

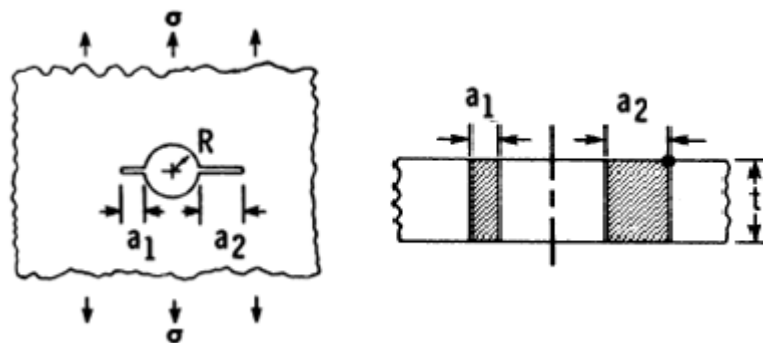


Figura 16 Dos grietas pasantes naciendo de un agujero

3.1.1.3 Grieta de esquina naciendo de un agujero

La configuración fue estudiada por Newman y Raju, y se resolvió usando elementos finitos tridimensionales. Su solución se reescribió conforme la siguiente expresión:

$$CR_{cor1} = \frac{K}{\sigma\sqrt{\pi c}} = CR_{cor2} \sqrt{\frac{8R \cdot t + \pi a c}{8R \cdot t + 2\pi a c}} \quad [27]$$

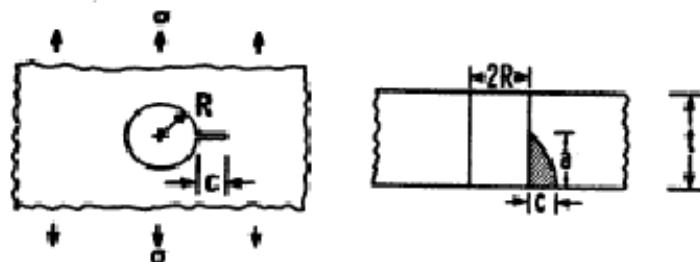


Figura 17 Grieta de esquina naciendo de un agujero

Donde

- $c \rightarrow$ longitud de la grieta
- $a \rightarrow$ profundidad de la grieta
- $t \rightarrow$ espesor de la placa
- $R \rightarrow$ Radio del agujero
- $\sigma \rightarrow$ Tensión aplicada
- $K \rightarrow$ Factor de intensidad de tensiones (SIF)

Como se puede observar esta configuración está relacionada con otra según CR_{COR2} . Esta variable corresponde a la variable adimensional de la configuración de dos grietas naciendo de un agujero. Este parámetro se define a continuación.

3.1.1.4 Dos grietas en esquina naciendo de un agujero

Newman y Raju resolvieron esta configuración usando un modelo 3D de elementos finitos. La metodología que se presenta a continuación se ha obtenido del manual de "NASGRO" (REF (14))

$$x = \frac{D}{D + 2 \cdot a \cdot \cos(0.85\phi)} \quad [28]$$

$$y = \frac{D}{D + 2 \cdot a \cdot \cos \left\{ \left[0.85 - 0.25 \cdot \left(\frac{b}{t} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \cdot \phi \right\}} \quad [29]$$

$$G_1 = \frac{0.7071 + 0.7548x + 0.3415x^2 + 0.642x^3 + 0.9196x^4}{1 + 0.13x^2} \quad [30]$$

$$G_2 = \frac{0.078x + 0.7588x^2 - 0.4293x^3 + 0.0644x^4 + 0.651x^5}{1 + 0.13x^2} \quad [31]$$

$$G_3 = \frac{0.7071 + 0.7548y + 0.3415y^2 + 0.642y^3 + 0.9196y^4}{1 + 0.13y^2} \quad [32]$$

3.1.1.4.1 Para $a \geq b$

$$x_o = 1.13 - 0.09 \frac{b}{a} + \left[\frac{0.89}{0.2 + \frac{b}{a}} - 0.54 \right] \left(\frac{b}{t} \right)^2 + \left[0.5 - \frac{1}{0.65 + \frac{b}{a}} + 14 \left(1 - \frac{b}{a} \right)^{24} \right] \left(\frac{b}{t} \right)^4 \quad [33]$$

$$f_1 = 1 + \left[0.1 + 0.35 \left(\frac{b}{t} \right)^2 \right] (1 - \sin \phi)^2 \quad [34]$$

$$f_2 = \left[0.1 + 0.04 \left(\frac{b}{a} \right) \right] \cdot [1 + 0.1(1 - \cos \phi)^2] \cdot \left[0.85 + 0.15 \cdot \left(\frac{b}{t} \right)^{\frac{1}{4}} \right] \quad [35]$$

$$f_3 = 1 - 0.7 \left(1 - \frac{b}{t} \right) \cdot \left(\frac{b}{a} - 0.2 \right) \cdot \left(1 - \frac{b}{a} \right) \quad [36]$$

$$f_x = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.464 \cdot \left(\frac{b}{a} \right)^{1.65}}} \quad [37]$$

$$f_\phi = \left[\left(\frac{b}{a} \right)^2 \cos^2 \phi + \sin^2 \phi \right]^{\frac{1}{4}} \quad [38]$$

$$h_{11} = -0.43 - 0.74 \frac{b}{a} - 0.84 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad [39]$$

$$h_{21} = -1.5 - 0.04 \frac{b}{a} - 1.73 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad [40]$$

$$h_{12} = 1.25 - 1.19 \frac{b}{a} + 4.39 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad [41]$$

$$h_{22} = 1.71 - 3.17 \frac{b}{a} + 6.84 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad [42]$$

$$h_{13} = -1.94 + 4.22 \frac{b}{a} - 5.51 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad [43]$$

$$h_{23} = -1.28 + 2.71 \frac{b}{a} - 5.22 \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad [44]$$

Con estos coeficientes ya se puede calcular el factor β , asumiendo valores de $\Phi=0^\circ$ y $\Phi=90^\circ$.

$$G_W = x_o \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_x \cdot f_\phi \quad [45]$$

$$H_1 = 1 + h_{11} \frac{b}{t} + h_{12} \left(\frac{b}{t} \right)^2 + h_{13} \left(\frac{b}{t} \right)^3 \quad [46]$$

$$H_2 = 1 + h_{21} \frac{b}{t} + h_{22} \left(\frac{b}{t} \right)^2 + h_{23} \left(\frac{b}{t} \right)^3 \quad [47]$$

$$\beta_a = G_1 \cdot G_W \quad [48]$$

A partir de este β se tiene que hacer una corrección para que sea aplicable a dos grietas de esquina

$$CR_{cor2} = \frac{K}{\sigma \sqrt{\pi c}} = \beta_a \cdot \sqrt{\frac{a+c+D}{a+D}} \quad [49]$$

En la siguiente figura se muestra el esquema de esta configuración

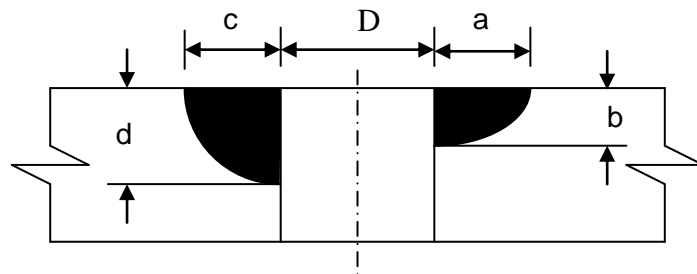


Figura 18 Dos grietas de esquina naciendo de un agujero

Con estas configuraciones se consigue llegar a la solución buscada: una grieta pasante y una en esquina, ambas naciendo de un agujero. La metodología incluye variables obtenidas en los apartados anteriores de la siguiente manera:

$$CR_{corth} = \frac{K}{\sigma \sqrt{\pi c_2}} = \left(\frac{CR_{cor1}}{CR_{Ho1}} \right) CR_{Ho2} \quad [50]$$

Para la grieta en esquina

$$CR_{corth} = \frac{K}{\sigma \sqrt{\pi c_1}} = CR_{Ho2} \quad [51]$$

Para la grieta pasante

En la Figura 19 se ve el esquema de la geometría a estudio:

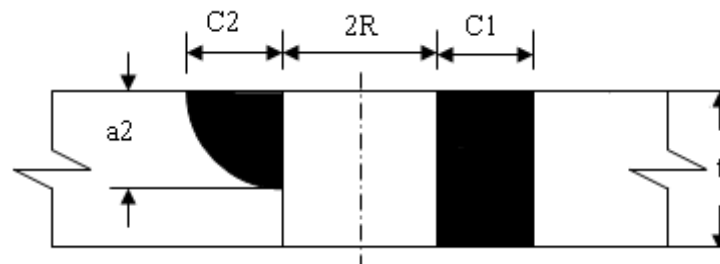


Figura 19 Grieta de esquina y grieta pasante naciendo de un agujero

3.1.2 Método numérico:

Para el método numérico se realiza un script o subrutina, escrita en lenguaje Python, con la que se programará tanto la definición del modelo con todas sus características, como el análisis a realizar. El código de la subrutina se muestra en el Anexo. En el siguiente apartado se explica cada uno de los módulos programados dentro de la subrutina.

3.2 Implementación de la subrutina para el cálculo del factor de intensidad de tensiones:

En la subrutina programada se genera un modelo estático con una geometría de grieta determinada sobre la que se estudia la mecánica de fractura. El objetivo es obtener el factor de intensidad de tensiones de manera automática en distintas geometrías de grieta. Para ello se tiene que programar un método iterativo o bucle, que vaya modificando la geometría y obtenga el factor en cada cambio de la misma.

Como en el problema se van a estudiar dos grietas se tiene que modificar la geometría de ambas. Para simplificar el bucle de la subrutina se supondrá que la grieta en esquina propaga, mientras la pasante se queda constante y viceversa.

El crecimiento de la grieta se supone sobre un sólido homogéneo, por lo que la grieta de esquina crece radialmente. Una vez que la grieta de esquina se convierte en pasante se para el primer proceso iterativo, se establecen las condiciones iniciales y se implementa el segundo bucle, donde la grieta de esquina queda constante y la pasante propaga.

Gracias a la programación en Python se pueden imponer condiciones de contorno en el modelo general y luego modificar la geometría de la grieta sobre la que se quiere hacer el estudio. Esto facilita mucho la obtención de resultados ya que sin la programación de este tipo de *scripts*, un problema como el que se quiere estudiar absorbería gran cantidad de tiempo.

A continuación se explica el script usado para la realización de este análisis. Hay que tener en cuenta que esta subrutina sólo realiza estudios de factor de intensidad de tensiones sobre grietas en placas con un agujero, sometidas a un estado de tracción.

Se realiza sobre una placa porque a pesar de su simplicidad geométrica, los resultados son aplicables a cualquier tipo de elemento mecánico con un agujero y sometido a tracción en la misma dirección que la estudiada en el modelo.

En la Figura 20 se presenta el modelo global con la geometría inicial de las grietas.

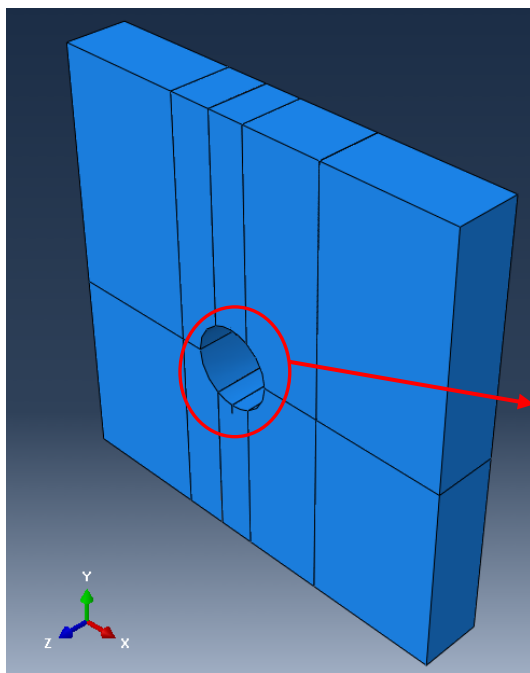


Figura 20 Modelo general

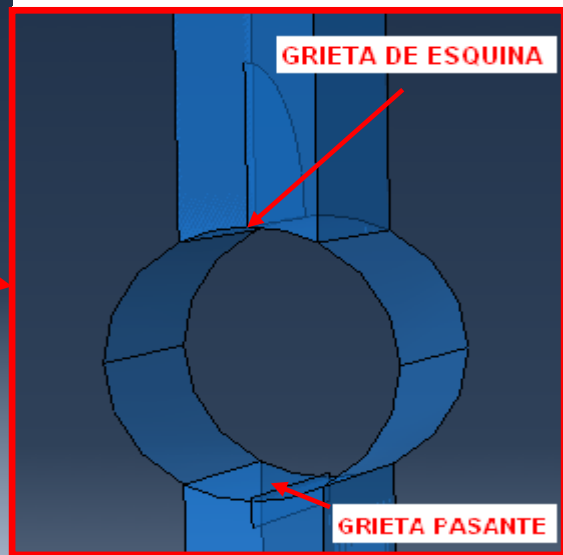


Figura 21 Zoom sobre el agujero

3.2.1 Datos de entrada:

La herramienta realizará todos los cálculos a partir de estos datos de entrada

3.2.1.1 Placa:

- Espesor
- Módulo de Young
- Módulo de Poisson
- Tenacidad de Fractura
- Límite de Fluencia
- Radio del agujero
- Coordenadas XY del centro del agujero
- Fuerza de tracción aplicada
- Longitud de Placa2-izquierda
- Longitud de Placa2-derecha
- Longitud de Placa2-grieta

3.2.1.2 Malla:

- Tamaño de los elementos en las *part* 's laterales
- Tamaño de los elementos de la malla de transición (menor que los anteriores pero no demasiado pequeños para evitar cálculos pesados)
- Tamaño mínimo de la malla progresiva (es recomendable que sea un décimo del tamaño inicial de la grieta de esquina)
- Tamaño máximo de la malla progresiva (es recomendable un valor de un décimo del espesor de la placa)
- Tamaño de los elementos en la *part* con la grieta pasante.

3.2.1.3 Grieta de esquina

- Profundidad de grieta inicial

3.2.1.4 Grieta pasante

- Profundidad de grieta inicial

3.2.2 Geometría de la placa:

La geometría de la placa está normalizada por tener un agujero. La norma de diseño exige que la distancia a borde sea como mínimo dos veces el diámetro del agujero realizado. Este agujero está pensado para introducir un bulón, que tendrá que resistir la cortadura producida por la tensión aplicada a la placa.

En el sólido que contiene la grieta de esquina se necesitan elementos muy pequeños, y eso no se aplica a toda la placa. Esta se modela uniendo ocho *parts* en los que se aplicarán distintos mallados.

Se usan uniones, porque en un análisis en XFEM, no se permite aplicar contactos, además los contactos permiten la separación de los elementos.

En las siguientes figuras se presentan las dimensiones de los distintos sólidos:

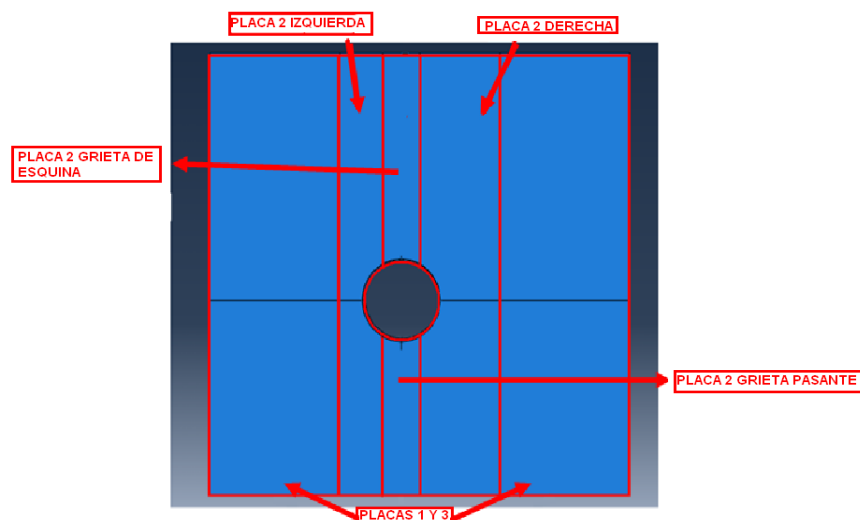


Figura 22 Esquema general de la placa con la división de los 8 sólidos

3.2.2.1 Placas 1 y 3

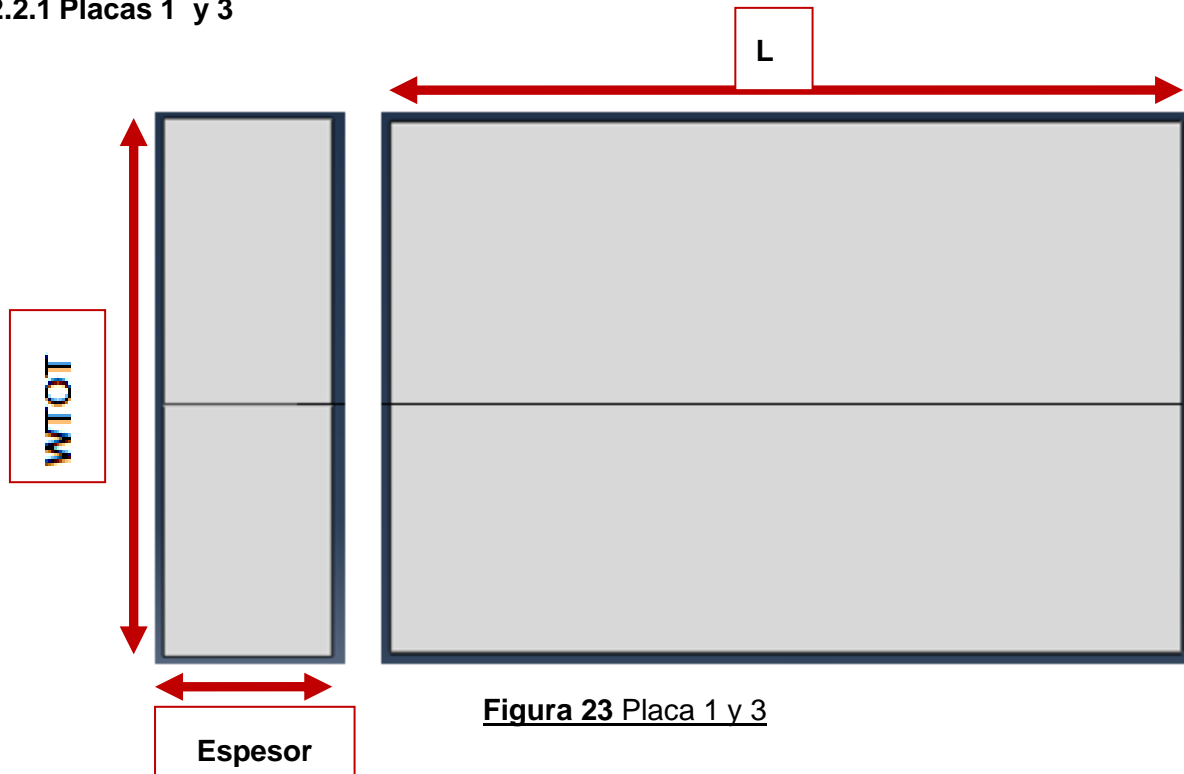


Figura 23 Placa 1 y 3

Donde:

- WTOT: depende del diámetro del bulón que se vaya a colocar en la placa el cual tiene que aguantar el esfuerzo de cortadura al que se le somete con la tracción de la placa. Esta variable sigue la siguiente función:

$$WTOT = 2[(2.5 \cdot (2 \cdot R)) + 1]$$

[52] (REF (15))

- L: depende de WTOT. Se ha hecho de esta forma porque siguiendo esta función se consigue que el agujero nunca esté en una distancia inferior a $(2.5D+1)$. Sigue la siguiente función:

$$L = \frac{[WTOT - Lplaca2]}{2}$$

[53] (REF (15))

Estos sólidos son para alargar la placa principal, donde se encuentra el agujero. Para hacer la función *tie* se deben definir dos superficies, que serán sobre las que se aplica la unión. Aparte de éstas, en la placa se crea otra superficie en la que se aplica el esfuerzo de tracción.

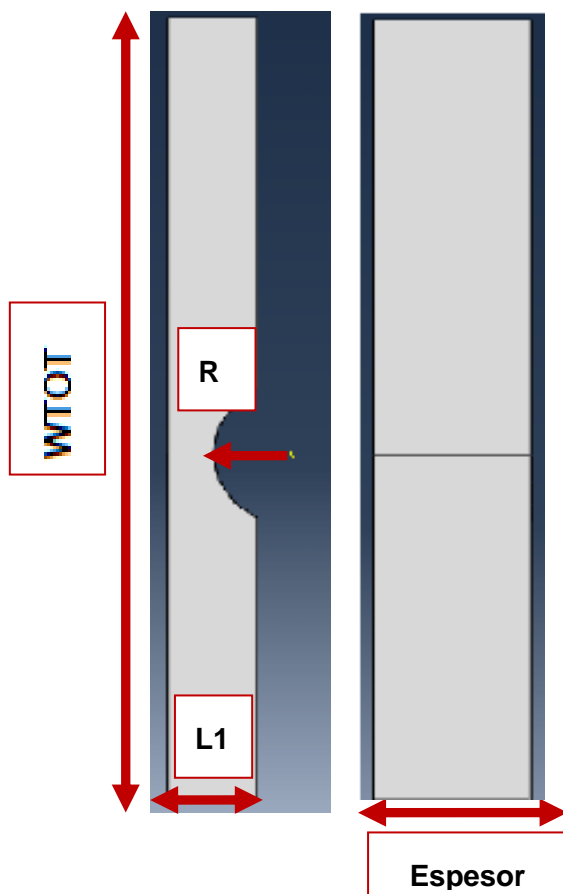
En la placa 1 se realiza un set donde se aplica el encastre. Se usa un encastre por evitar los movimientos de la placa, pero la reacción en dicho encastre será igual y en sentido contrario a la única carga aplicada sobre el modelo a estudio.

3.2.2.2 Placa 2

Dentro de la placa 2 existen cuatro sólidos, que al unirse forman el total de la placa y su agujero. Como en el apartado anterior estos sólidos tienen que unirse mediante la función *tie* que se explicará más adelante en este documento (apartado 3.2.6). La suma de las longitudes a lo largo del eje de estos sólidos, una vez posicionados formando la placa, es la variable L_{placa2} , introducida antes en la ecuación de L (Ecuación 51)

Para evitar confusiones con los sólidos a la hora de colocarlos, se nombran en función de su posición (Izquierda o derecha de las grietas) y de la grieta que contienen (grieta en esquina o grieta pasante).

3.2.2.2.1 Placa 2 izquierda



Las dimensiones que tenemos en la placa 2 izquierda son datos que se introducen al principio de la herramienta de cálculo. Donde R es el radio del bulón que se va a introducir en el agujero. El $WTOT$ que corresponde al ancho de la placa sigue la misma función que en las placas 1 y 3.

Una vez creada la placa y debido a que contiene una curva, y por esta geometría la malla no va a poder estar estructurada, se realiza una partición a la altura del centro del agujero. Esto divide el sólido en d y permite que la malla de hexaedros esté estructurada.

Figura 24 Placa2 izquierda

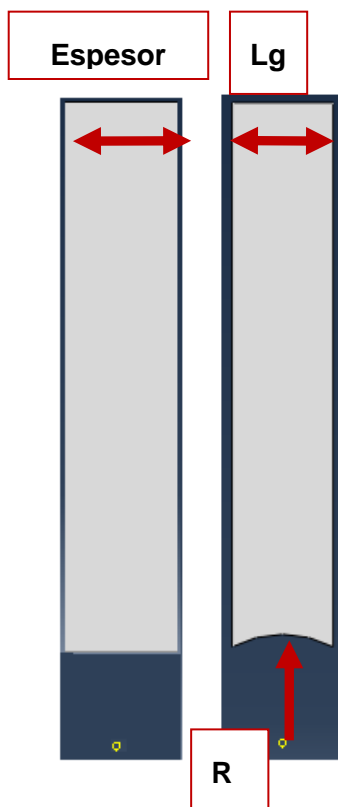
3.2.2.2.2 Placa2_derecha

Al igual que en la placa 2_izquierda los datos de esta placa son introducidos al comienzo de la herramienta. Y R es el radio del bulón.

Se puede observar que la placa también tiene una partición. Ésta se realiza por la misma razón que en la placa anterior, es decir, para conseguir una malla estructurada de hexaedros.



Figura 25 Placa2_derecha



3.2.2.2.3 Placa2_grieta de esquina:

Los datos de este sólido se introducen como dato al principio de la herramienta. Como en las placas izquierda y derecha aparecen zonas curvas cuyo radio está definido por el del bulón introducido. En los anteriores sólidos se hacían particiones para conseguir un mallado estructurado. En este sólido no hace falta pues la curva se asemeja mucho a una línea horizontal, por lo que los elementos Hexaédricos de la malla se ajustarán sin presentar formas irregulares.

3.2.2.2.4 Placa2_grieta de esquina:

Esta placa presenta las mismas características que la de la grieta en esquina.

Figura 26 Placa2_grieta de esquina

3.2.3 Geometría de las grietas

Para introducir las grietas en el modelo es necesario crear dos superficies planas que sirvan como zona de discontinuidad dentro del sólido, es decir, la zona que define la grieta. Para ello se crean dos *parts* 2D, con la geometría que se desee simular. En este caso las grietas tienen que estar parametrizadas y ser dependientes de una variable que se modifica a lo largo del *script*.

3.2.3.1 Grieta de esquina

En esta grieta se realiza la suposición inicial que es un cuarto de círculo perfecto, y que, como el material del modelo, es perfectamente homogéneo. Ésta se propagará conservando su forma inicial. Con estas hipótesis se consigue una simplicidad a la hora de programar la geometría de la grieta pues sólo depende del radio de la misma.

Los valores iniciales del radio se introducen como dato, así como el incremento de los mismos en función de cuantos resultados se requieran.

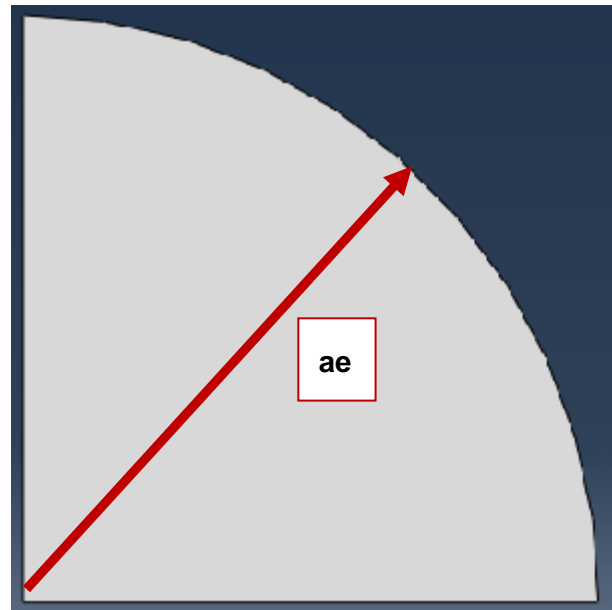


Figura 27 Grieta de esquina

Para definir esta superficie como grieta se selecciona la superficie entera y se crea con ella un *set* al que se recurrirá luego para simular la fisura.

3.2.3.2 Grieta Pasante

Para el modelado de esta grieta, se realiza una *part* 2D al igual que en el caso anterior. Esta se define como un rectángulo en el que la variable de la que depende la geometría es la altura del mismo, que definirá la profundidad. Como en la grieta de esquina se crea un *set* con la superficie, que se usará para incorporar la grieta,

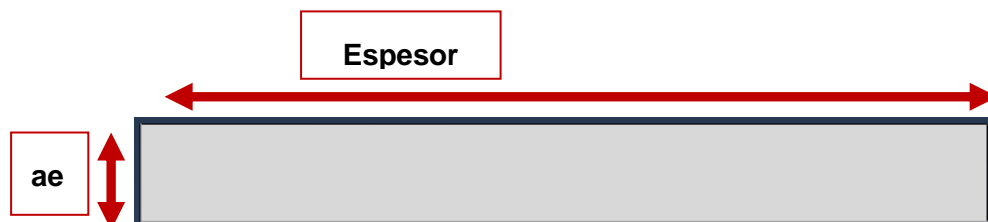


Figura 28 Grieta pasante

3.2.4 Propiedades del material

Se ha creado un material único para la placa, el cual se aplica a todos los sólidos.

En función del material que se cree los resultados que se obtengan serán distintos.

En principio, si se estudiase con un análisis FEM, con definir un material perfectamente elástico sería suficiente, pues se asumía que la deformación plástica se producía en una zona tan pequeña que era despreciable. Al usar el Modulo XFEM se tienen que añadir propiedades adicionales a las ya utilizadas para definir el material perfectamente elástico.

Las propiedades para definir el material que se usan son:

- Módulo de Young
- Coeficiente de Poisson
- Tenacidad de Fractura
- Tensión de fluencia

3.2.5 STEP

Se crea un *step* donde se aplicará la carga. Este step es el definido por defecto en Abaqus.

3.2.6 Interactions

Como ya se menciona en apartados anteriores en esta herramienta se realizan unas uniones entre sólidos para conseguir la geometría total de la placa. Estas uniones se realizan para transmitir las condiciones de contorno entre sólidos, además de tener la ventaja de que los nodos entre los sólidos no deben coincidir, ya que en la función *tie* se define un radio mínimo dentro del que se conectan los nodos con el que sirve de centro de ese círculo. Debido que estas funciones tienen que tener definidas dos superficies (*master* y *slave*) En el apartado 3.2.2 se han creado estas superficies.

La superficie *master* es la encargada de transmitir los resultados de las ecuaciones constitutivas a la superficie *slave* por lo que se recomienda que la superficie *master* se encuentre en el sólido que recibe la fuerza.

En este módulo hay programado otro tipo de *interaction*. Se trata de un contacto que está pensado para que si se somete a un esfuerzo de compresión a la placa las dos superficies creadas por la grieta no se atraviesen la una a la otra.

Dentro de este módulo existe la función *crack* en la que con las superficies que simulan la fisura, se genera la fisura del sólido.

Para definir las grietas hay que considerar: por un lado el sólido que va a ser fisurado y por otro, la superficie que defina la geometría de la grieta. Dentro de esta función se puede activar la opción de dejar propagar la grieta libremente, pero no es lo que se busca con este estudio.

En las siguientes figuras se presentan las funciones del módulo *interaction*, y las superficies y sólidos usados.

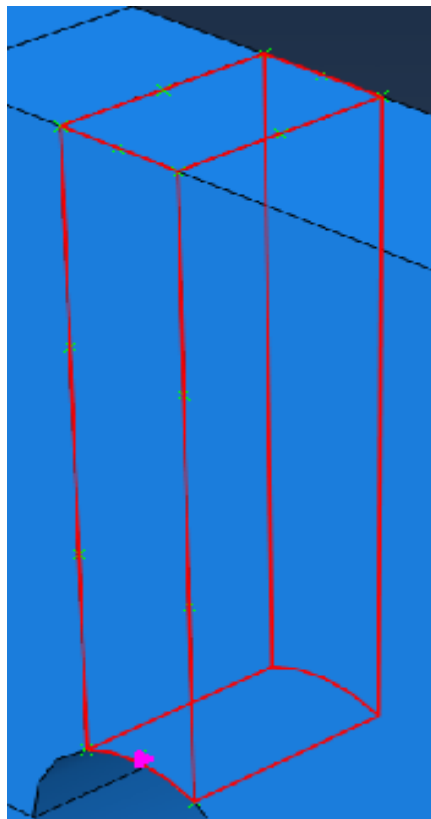


Figura 29 Grieta de esquina

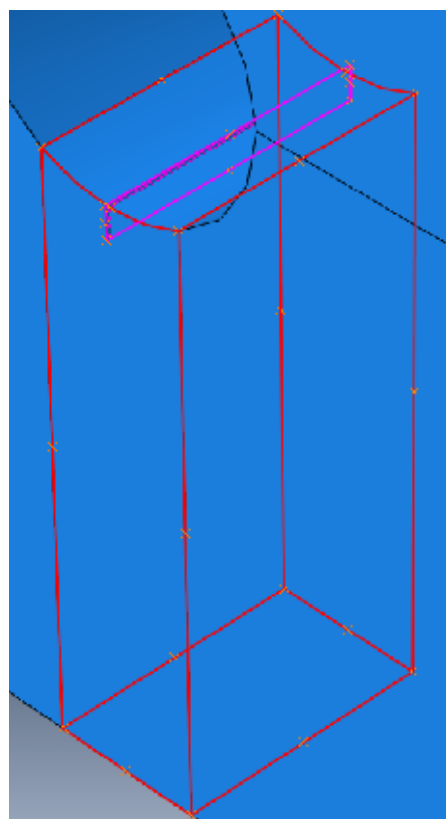


Figura 30 Grieta pasante

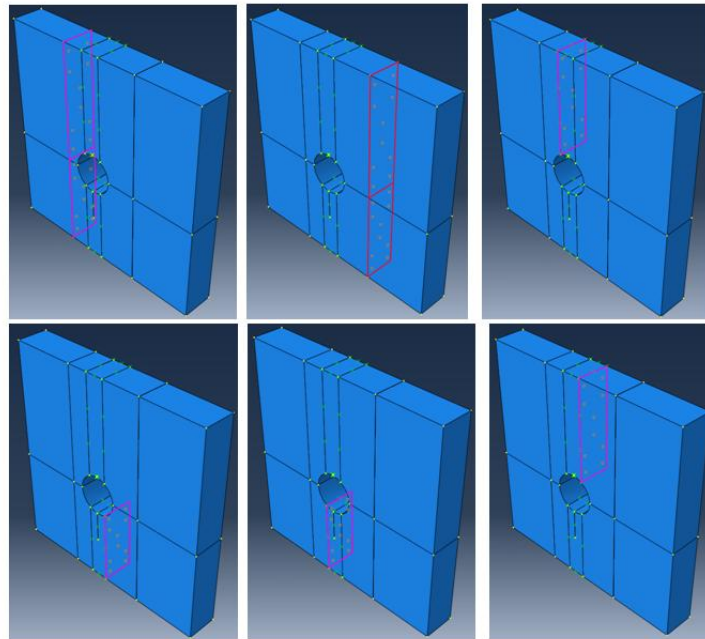


Figura 31 Superficies de unión

3.2.7 Cargas y condiciones de contorno

Para que este análisis se pueda realizar el conjunto del modelo tiene que estar sometido a unas cargas y condiciones de contorno específicos.

- Empotramiento: se empotra un extremo para evitar el desplazamiento de la placa a lo largo del eje en el que se aplica la tensión
- Esfuerzo de tracción: se aplica una carga de tracción uniforme sobre la superficie libre, paralela al empotramiento.

En la siguiente figura se muestran tanto el empotramiento como la tracción aplicada a la placa

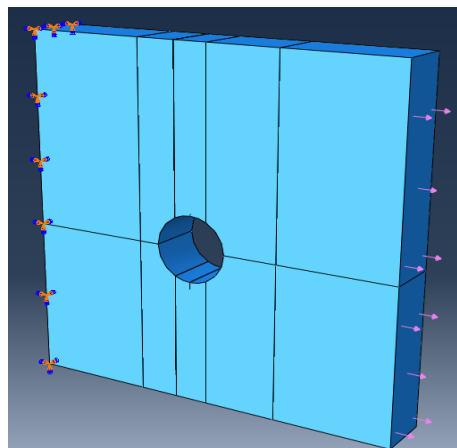


Figura 32 Cargas y condiciones de contorno

3.2.8 Mallado

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores el análisis que más interesa, y del que se obtienen los resultados más importantes es el que se realiza sobre los sólidos de Placa2_grieta de esquina y Placa2_grieta pasante. Debido a la cantidad de análisis que se realizan sobre estas zonas, es recomendable que el mallado en el resto de sólidos no sea demasiado fino, para aligerar el cálculo.

Como se ha explicado en el apartado 3.2.2, la placa se ha realizado uniendo varios sólidos. Esto es conveniente para que el mallado de las zonas de menor importancia no se vean afectadas por las semillas de los sólidos que contienen las grietas, permitiendo un mallado más grande.

Se han usado mallas estructuradas de hexaedros, porque se obtienen mejores resultados que si fuesen de tetraedros, debido a la mayor rigidez de los segundos.

En los sólidos que contienen las grietas se hace el mallado más fino y, dependiendo del tipo de grieta que contengan, se realiza un mallado lineal o progresivo. Si la grieta es pasante sólo crece en un eje y el frente de grieta es lineal, por lo que el mallado tendrá la misma forma y sus elementos tendrán un tamaño igual al incremento que se analice.

En la grieta de esquina, aunque sólo dependa de una variable, ésta se aplica sobre dos ejes, por lo que el frente de grieta será progresivo y no lineal. En el sólido se mallará con un mallado progresivo. Como se recomienda que el tamaño del elemento en el frente de la grieta sea un decimo de la longitud de la misma, los elementos tendrán los siguientes tamaños inicial y final:

- Tamaño inicial: $SM_{min}=ae/10$, (REF (15))
- Tamaño final: $SM_{max}=espesor/10$ (REF (15))

Se tiene que considerar que la grieta crece en dos ejes por lo que las semillas progresivas se tienen que colocar en ambos ejes.

En los sólidos que forman la Placa 2, que no contienen grietas, se hace un mallado más fino que en las placas 1 y 3, para tener unos elementos de transición que permiten que no haya un salto tan grande entre los elementos más finos y los del resto de placas.

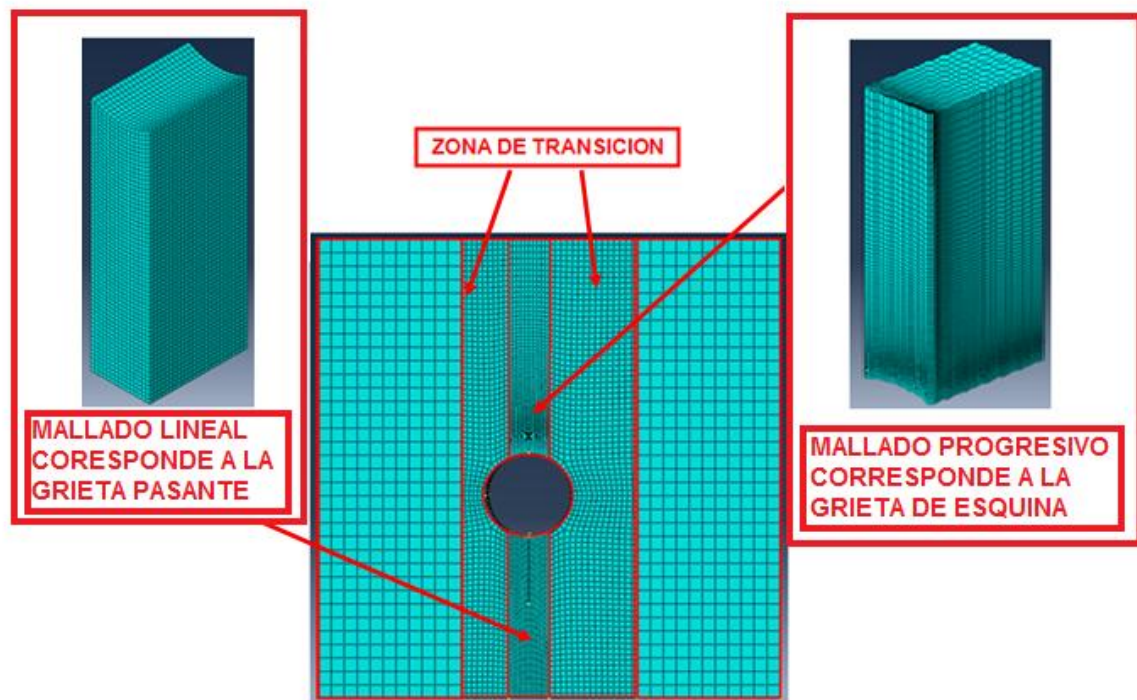


Figura 33 Mallado del modelo y zonas de mallado.

3.2.9 Outputs

Los outputs requeridos para el análisis, son los K o factores de intensidad de tensiones. Estos se obtienen creando History Output Request para cada una de las grietas, porque no se puede realizar uno solo para ambas grietas.

El output se define para que nos dé resultados en cinco contornos, en cada incremento. Y se marca como criterio de iniciación de grieta que se supera la tensión tangencial máxima.

4 EJEMPLO DE APLICACIÓN Y RESULTADOS

En este apartado se va a exponer un ejemplo de aplicación de la herramienta de cálculo numérico y se compararán los resultados con los obtenidos en un análisis analítico de la misma geometría del modelo.

4.1 Datos de entrada

4.1.1 Placa

- Espesor $\rightarrow 5$ mm
- Módulo de Young $\rightarrow 71020.0$ MPa
- Módulo de Poisson $\rightarrow 0.33$
- Tenacidad de Factura $\rightarrow 100\text{MPa}\cdot(\text{mm})^{1/2}$
- Límite de Fluencia $\rightarrow 461.7$ MPa
- Radio del agujero $\rightarrow 3.2$ mm
- Coordenadas XY del centro del agujero
 - $X \rightarrow 5\text{mm}$
 - $Y \rightarrow 15\text{mm}$
- Fuerza de tracción aplicada $\rightarrow 50\text{MPa}$
- Longitud de Placa2-izquierda $\rightarrow 3.5$ mm
- Longitud de Placa2-dercha $\rightarrow 6.5$ mm
- Longitud de Placa2-grieta $\rightarrow 3$ mm

4.1.2 Malla

- Tamaño de los elementos en las *part's* laterales $\rightarrow 1$ mm
- Tamaño de los elementos de la malla de transición $\rightarrow 0.4$ mm
- Tamaño mínimo de la malla progresiva $\rightarrow 0.02$ mm
- Tamaño máximo de la malla progresiva $\rightarrow 0.5$ mm
- Tamaño de los elementos en la part con la grieta pasante. $\rightarrow 0.3$ mm

4.1.3 Grieta de esquina

- Profundidad de grieta inicial $\rightarrow 0.2$ mm

4.1.4 Grieta pasante

- Profundidad de grieta inicial $\rightarrow 0.5$ mm

4.2 Método analítico

En este apartado se ha realizado un script en Visual Basic, que al implementarlo en Excel nos da las tablas de resultados que se presentan a continuación:

	longitud de grieta(mm)	GRIETA PASANTE															
		0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5
GRIETA DE ESQUINA	0.2	157,76	175,46	185,00	190,92	195,05	198,26	200,98	203,43	205,74	207,98	210,18	212,37	214,57	216,77	218,98	221,20
	0.4	158,31	176,07	185,63	191,55	195,69	198,89	201,60	204,05	206,35	208,58	210,78	212,97	215,15	217,35	219,55	221,77
	0.6	159,02	176,85	186,43	192,36	196,50	199,71	202,41	204,85	207,15	209,37	211,56	213,74	215,91	218,10	220,30	222,50
	0.8	159,87	177,77	187,38	193,33	197,47	200,67	203,37	205,80	208,08	210,30	212,48	214,65	216,82	218,99	221,18	223,37
	1	160,82	178,81	188,46	194,42	198,56	201,76	204,45	206,87	209,15	211,35	213,52	215,68	217,84	220,00	222,18	224,36
	1.2	161,88	179,96	189,65	195,62	199,76	202,96	205,64	208,06	210,32	212,51	214,67	216,82	218,97	221,12	223,28	225,45
	1.4	163,02	181,20	190,94	196,93	201,07	204,26	206,94	209,34	211,60	213,78	215,92	218,06	220,19	222,33	224,48	226,64
	1.6	164,24	182,54	192,32	198,33	202,47	205,66	208,33	210,72	212,97	215,13	217,27	219,39	221,51	223,64	225,77	227,92
	1.8	165,54	183,95	193,79	199,81	203,96	207,14	209,81	212,19	214,42	216,58	218,70	220,80	222,91	225,03	227,15	229,28
	2	166,90	185,45	195,33	201,37	205,53	208,71	211,36	213,73	215,95	218,10	220,21	222,30	224,39	226,49	228,60	230,72
	2.2	168,33	187,01	196,95	203,01	207,18	210,35	213,00	215,36	217,57	219,70	221,79	223,87	225,95	228,04	230,13	232,23
	2.4	169,82	188,64	198,64	204,72	208,89	212,06	214,70	217,05	219,25	221,37	223,45	225,51	227,58	229,65	231,73	233,82
	2.6	171,37	190,33	200,39	206,50	210,68	213,84	216,47	218,81	221,00	223,10	225,17	227,22	229,27	231,33	233,40	235,47
	2.8	172,97	192,08	202,20	208,34	212,52	215,69	218,31	220,64	222,81	224,91	226,96	229,00	231,04	233,08	235,13	237,18
	3	174,62	193,88	204,07	210,24	214,43	217,59	220,21	222,53	224,69	226,77	228,81	230,83	232,86	234,89	236,92	238,96
	3.2	176,32	195,74	206,00	212,19	216,39	219,56	222,17	224,48	226,63	228,69	230,72	232,73	234,74	236,75	238,77	240,80
	3.4	178,06	197,64	207,98	214,20	218,41	221,57	224,18	226,48	228,62	230,67	232,68	234,68	236,68	238,68	240,68	242,70
	3.6	179,84	199,60	210,00	216,26	220,48	223,64	226,24	228,53	230,66	232,70	234,70	236,69	238,67	240,66	242,65	244,65
	3.8	181,66	201,59	212,08	218,37	222,60	225,76	228,36	230,64	232,76	234,79	236,78	238,75	240,72	242,69	244,67	246,65
	4	183,53	203,63	214,19	220,52	224,76	227,93	230,52	232,79	234,90	236,92	238,90	240,86	242,81	244,77	246,74	248,71
	4.2	185,42	205,71	216,35	222,71	226,97	230,14	232,72	234,99	237,09	239,10	241,06	243,01	244,96	246,90	248,85	250,81
	4.4	187,35	207,83	218,55	224,95	229,22	232,39	234,98	237,24	239,33	241,32	243,28	245,21	247,15	249,08	251,02	252,97
	4.6	189,31	209,98	220,78	227,22	231,51	234,69	237,27	239,52	241,60	243,59	245,54	247,46	249,38	251,30	253,23	255,16
	4.8	191,30	212,16	223,05	229,53	233,84	237,02	239,60	241,85	243,92	245,90	247,83	249,75	251,66	253,57	255,48	257,41

Tabla 1 valores de K_I para la grieta pasante en función de las geometrías de ambas grietas

		GRIETA PASANTE															
GRIETA DE ESQUINA	longitud de grieta(mm)	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2	2,3	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,4	4,7	5
	0,2	76,02	77,10	78,18	79,25	80,32	81,37	82,42	83,46	84,50	85,52	86,54	87,55	88,56	89,55	90,54	91,52
	0,4	100,43	101,86	103,28	104,68	106,08	107,47	108,85	110,22	111,58	112,93	114,28	115,61	116,93	118,24	119,54	120,83
	0,6	115,60	117,23	118,86	120,47	122,07	123,66	125,24	126,81	128,37	129,92	131,45	132,98	134,49	136,00	137,49	138,97
	0,8	126,35	128,13	129,89	131,65	133,39	135,11	136,83	138,54	140,23	141,91	143,58	145,24	146,89	148,52	150,14	151,75
	1	134,66	136,53	138,40	140,25	142,09	143,92	145,74	147,54	149,34	151,12	152,89	154,64	156,39	158,12	159,84	161,54
	1,2	141,50	143,45	145,40	147,33	149,25	151,16	153,05	154,93	156,80	158,66	160,51	162,34	164,16	165,97	167,76	169,55
	1,4	147,45	149,47	151,47	153,47	155,45	157,42	159,38	161,33	163,26	165,18	167,09	168,99	170,87	172,74	174,60	176,44
	1,6	152,86	154,93	156,99	159,04	161,07	163,10	165,11	167,11	169,09	171,07	173,03	174,98	176,92	178,84	180,76	182,66
	1,8	157,95	160,06	162,17	164,26	166,35	168,42	170,48	172,52	174,56	176,58	178,59	180,59	182,57	184,55	186,51	188,45
	2	162,87	165,02	167,17	169,31	171,43	173,55	175,65	177,74	179,81	181,88	183,93	185,98	188,00	190,02	192,03	194,02
	2,2	167,72	169,92	172,10	174,27	176,44	178,59	180,73	182,86	184,98	187,08	189,18	191,26	193,33	195,39	197,44	199,47
	2,4	172,58	174,81	177,03	179,24	181,44	183,63	185,81	187,97	190,13	192,27	194,41	196,53	198,64	200,73	202,82	204,89
	2,6	177,49	179,76	182,01	184,25	186,49	188,71	190,92	193,13	195,32	197,50	199,67	201,83	203,98	206,11	208,24	210,35
	2,8	182,50	184,79	187,08	189,35	191,62	193,88	196,13	198,36	200,59	202,81	205,01	207,21	209,39	211,57	213,73	215,88
	3	187,61	189,94	192,26	194,56	196,86	199,15	201,43	203,71	205,97	208,22	210,46	212,69	214,91	217,12	219,32	221,51
	3,2	192,86	195,22	197,56	199,90	202,23	204,55	206,87	209,17	211,47	213,75	216,03	218,30	220,55	222,80	225,03	227,26
	3,4	198,25	200,63	203,00	205,37	207,73	210,08	212,43	214,77	217,09	219,41	221,73	224,03	226,32	228,60	230,87	233,13
	3,6	203,77	206,18	208,58	210,97	213,36	215,75	218,12	220,49	222,85	225,20	227,55	229,88	232,21	234,53	236,83	239,13
	3,8	209,42	211,85	214,28	216,71	219,12	221,54	223,94	226,34	228,73	231,12	233,49	235,86	238,22	240,57	242,91	245,25
	4	215,20	217,65	220,11	222,56	225,00	227,44	229,87	232,30	234,72	237,14	239,55	241,95	244,34	246,73	249,10	251,47
	4,2	221,08	223,56	226,03	228,51	230,98	233,44	235,90	238,36	240,81	243,25	245,69	248,12	250,55	252,96	255,37	257,77
	4,4	227,04	229,54	232,04	234,54	237,03	239,52	242,00	244,49	246,96	249,44	251,90	254,36	256,82	259,26	261,70	264,14
	4,6	233,06	235,58	238,10	240,61	243,13	245,64	248,15	250,65	253,15	255,65	258,15	260,63	263,12	265,59	268,06	270,53
	4,8	239,10	241,64	244,17	246,70	249,23	251,76	254,29	256,82	259,35	261,87	264,39	266,90	269,41	271,91	274,41	276,90

Tabla 2 valores de K_I para la grieta de esquina en función de las geometrías de ambas grietas

Estos resultados están sacados con las ecuaciones [50] y [51] descritas en el capítulo 3

A partir de estas tablas se pueden sacar líneas de comportamiento de K_I en función de los valores de longitud de las grietas y analizando los resultados se ve que para la grieta pasante los valores de K_I son mucho mayores que los de grieta de esquina. También se puede apreciar que para cada grieta, el valor del factor de intensidad de tensiones se ve mucho más afectado por el crecimiento propio que por el crecimiento de la otra grieta, aunque la grieta pasante está más influenciada por el crecimiento de la grieta de esquina.

Con estas tablas se realizan unas graficas que presentan el valor de K_I frente al tamaño de la grieta pasante y K_I frente al tamaño de la grieta de esquina.

En las graficas se llama “ge” a la longitud de grieta en esquina, y “gp” a la longitud de grieta pasante.

4.2.1 K_I con respecto a la profundidad de grieta pasante

En los dos siguientes gráficos se muestran los valores del factor de intensidad de tensiones para cada una de las grietas con respecto a la profundidad de la grieta pasante

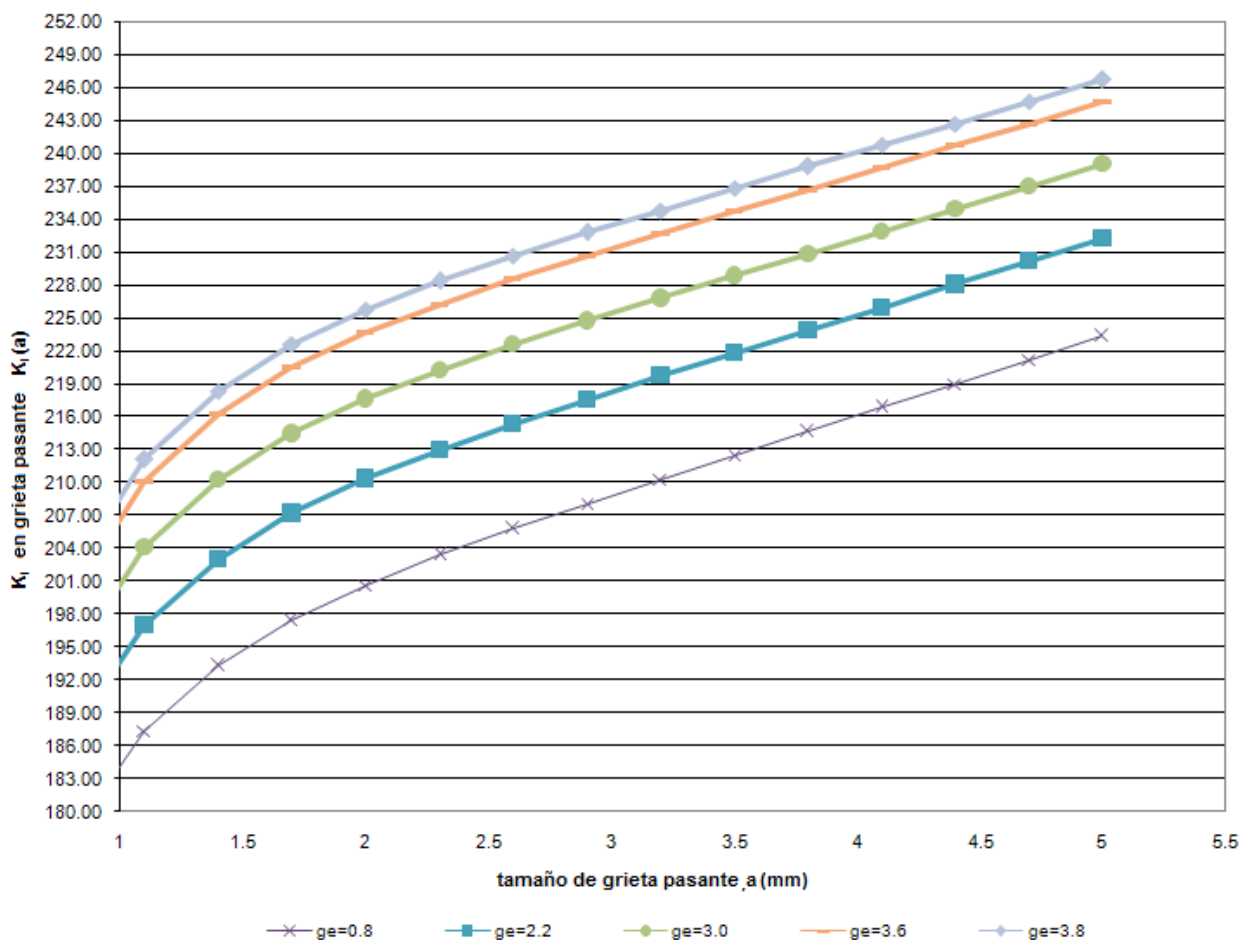


Figura 34 valores de K_I de la grieta pasante

Se observa una tendencia casi lineal a lo largo de la gráfica total. Hasta un valor de $a=2\text{mm}$ hay una ligera curvatura, pero por ser muy pequeño respecto al total no se tiene en cuenta. Sólo se han representado algunas geometrías para mayor claridad en el gráfico.

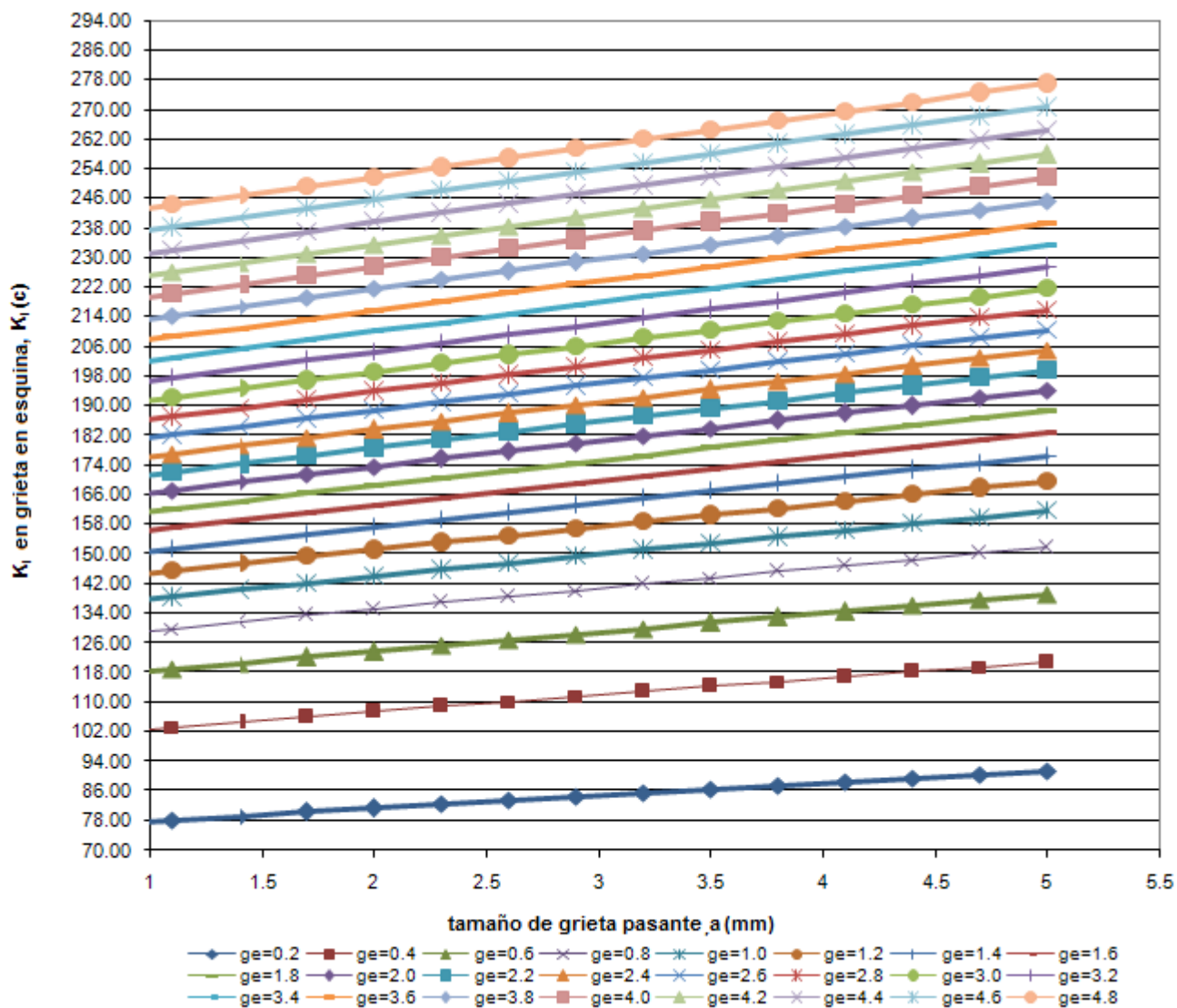


Figura 35 valores de K_I de la grieta en esquina

Se aprecia que en la grieta en esquina el valor de K_I crece con una función lineal, que mantiene la pendiente constante. Lo único que diferencia los valores iniciales es la profundidad de cada una de las grietas de esquina.

4.2.2 K_I con respecto la profundidad de grieta de esquina

En las dos siguientes gráficas se muestran los valores del factor de intensidad de tensiones para cada una de las grietas con respecto a la profundidad de la grieta de esquina

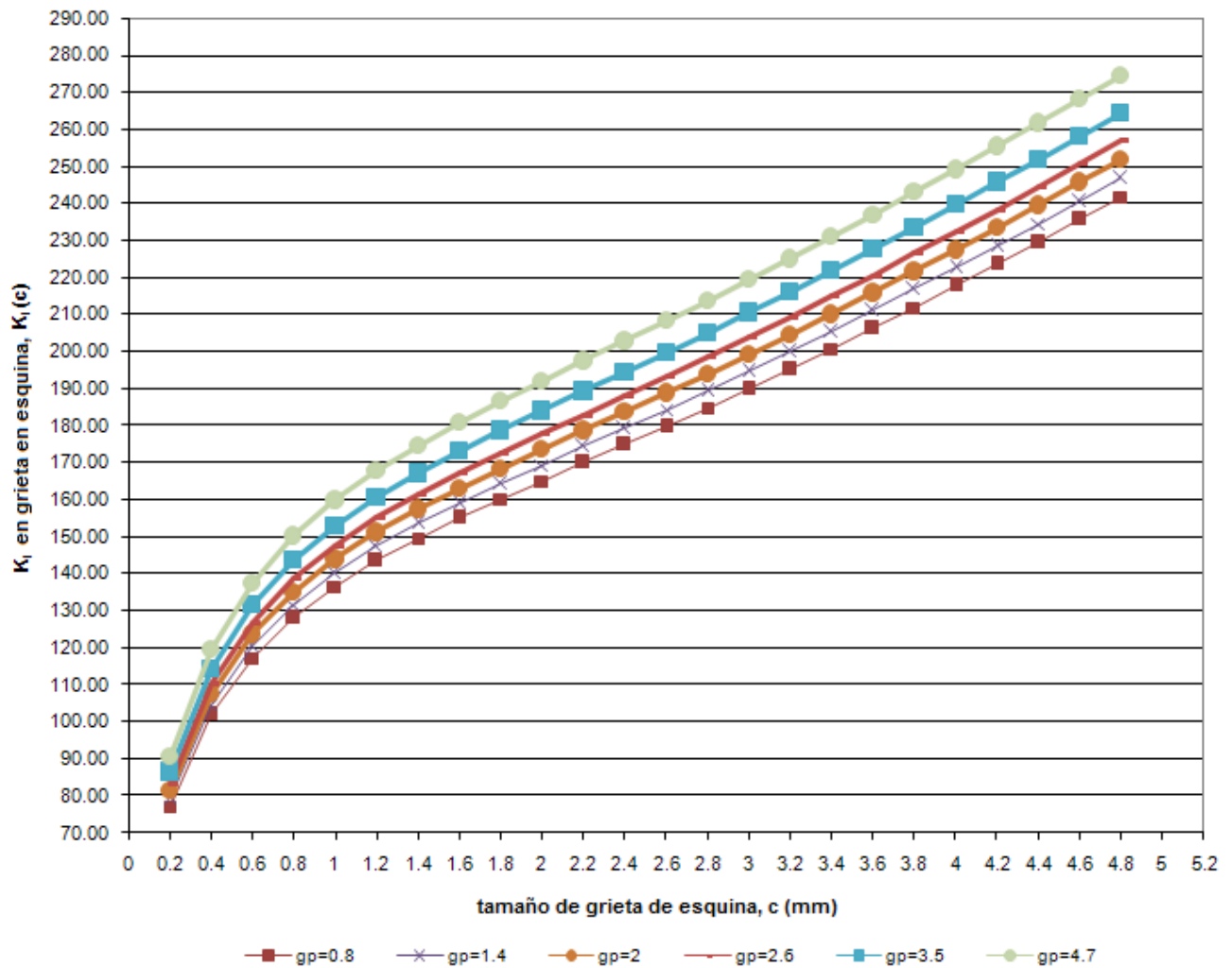


Figura 36 valores de K_I de la grieta en esquina

A partir del valor $c=0.8\text{mm}$ la línea que representa los valores de K_I sigue una tendencia lineal. Por lo que los valores por debajo de 0.8mm no se consideran para la comparación pues no son representativos frente al conjunto completo de valores de K_I .

Como en la **Figura 34** sólo se han representado algunas geometrías representativas para mayor claridad en el gráfico.

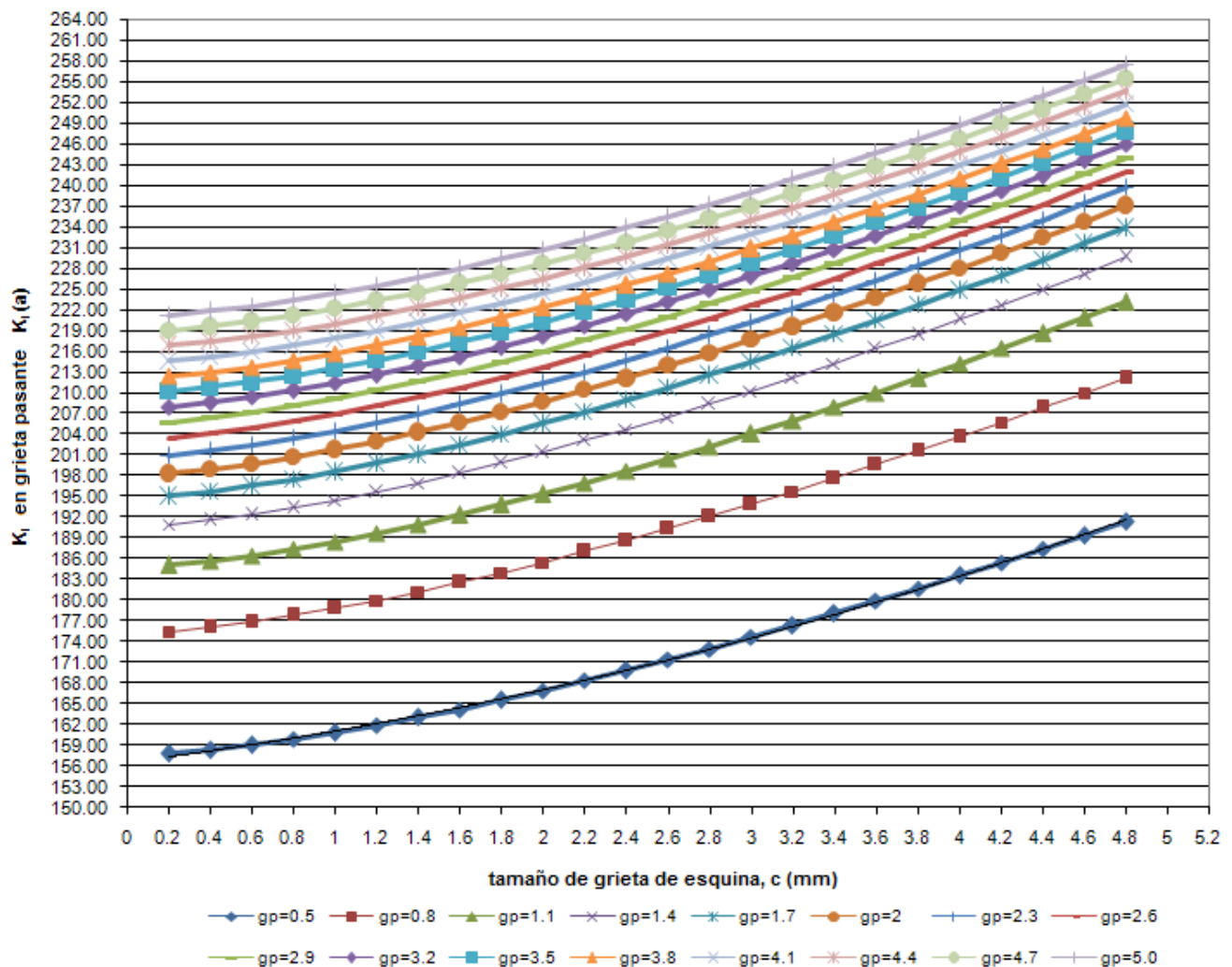


Figura 37 valores de K_I de la grieta pasante

Se aprecia una tendencia polinómica de grado dos en los valores de K_I en la grieta pasante cuando va creciendo la grieta de esquina.

Se puede apreciar un pequeño incremento en la diferencia de K_I entre los puntos iniciales y finales a medida que aumenta la profundidad de la grieta pasante.

4.3 Método numérico

Al utilizar la subrutina o script, programado para implementarlo en Abaqus hemos obtenido los siguientes resultados.

		GRIETA PASANTE															
GRIETA DE ESQUINA	longitud de grieta(mm)	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5
	0.2	192,69	207,20	217,48	223,87	228,21	231,88	235,98	240,85	246,18	249,04	251,97	255,57	259,80	264,65	269,89	275,57
	0.4	192,75	207,25	217,54	223,94	228,28	231,93	236,05	240,92	246,24	249,12	252,04	255,65	264,73	259,88	269,96	275,64
	0.6	192,87	207,39	217,68	224,08	228,42	232,08	236,20	241,07	246,39	249,27	252,18	255,80	260,02	264,87	270,11	275,79
	0.8	193,08	207,60	217,92	224,31	228,66	232,32	236,44	241,30	246,64	249,52	252,43	256,04	260,26	265,13	270,36	276,06
	1	193,36	207,91	218,25	224,65	229,00	232,67	236,79	241,66	246,99	249,88	252,80	256,41	260,64	265,51	270,74	276,44
	1.2	193,77	208,35	218,71	225,13	229,47	233,15	237,28	242,16	247,50	250,38	253,29	256,91	261,14	266,00	271,25	276,95
	1.4	194,29	208,92	219,30	225,74	230,11	233,78	237,91	242,80	248,14	251,02	253,95	257,57	261,81	266,66	271,92	277,64
	1.6	194,93	209,61	220,03	226,49	230,86	234,54	238,68	243,58	248,93	251,81	254,73	258,35	262,61	267,47	272,74	278,46
	1.8	195,72	210,46	220,91	227,39	231,79	235,48	239,62	244,54	249,89	252,78	255,70	259,32	263,58	268,47	273,74	279,48
	2	196,65	211,46	221,97	228,49	232,89	236,60	240,75	245,67	251,05	253,93	256,85	260,49	264,75	269,65	274,93	280,69
	2.2	197,76	212,66	223,25	229,78	234,22	237,93	242,09	247,03	252,42	255,31	258,23	261,87	266,14	271,06	276,36	282,14
	2.4	198,97	213,98	224,61	231,20	235,66	239,37	243,56	248,51	253,93	256,81	259,74	263,38	267,67	272,59	277,92	283,71
	2.6	200,38	215,49	226,21	232,84	237,32	241,06	245,25	250,23	255,65	258,54	261,47	265,14	269,44	274,38	279,73	285,54
	2.8	201,93	217,18	227,98	234,67	239,17	242,93	247,14	252,15	257,58	260,49	263,42	267,08	271,40	276,37	281,74	287,58
	3	203,74	219,12	230,04	236,77	241,31	245,10	249,33	254,36	259,83	262,72	265,66	269,35	273,68	278,68	284,07	289,94
	3.2	205,71	221,26	232,28	239,09	243,65	247,47	251,73	256,78	262,29	265,19	268,13	271,83	276,19	281,20	286,63	292,54
	3.4	207,85	223,56	234,70	241,59	246,19	250,04	254,32	259,40	264,94	267,85	270,80	274,50	278,90	283,95	289,40	295,34
	3.6	210,05	225,94	237,21	244,16	248,81	252,68	257,00	262,11	267,68	270,59	273,55	277,28	281,70	286,77	292,26	298,25
	3.8	212,64	228,73	240,15	247,19	251,89	255,79	260,14	265,30	270,92	273,83	276,80	280,55	285,00	290,11	295,65	301,68
	4	215,22	231,52	243,08	250,21	254,96	258,91	263,29	268,49	274,15	277,07	280,05	283,82	288,30	293,46	299,03	305,11
	4.2	218,29	234,87	246,60	253,85	258,65	262,64	267,06	272,32	278,02	280,95	283,94	287,75	292,26	297,47	303,10	309,23
	4.4	221,44	238,27	250,17	257,53	262,40	266,42	270,90	276,20	281,97	284,91	287,91	291,74	296,31	301,56	307,24	313,44
	4.6	224,76	241,85	253,96	261,43	266,37	270,45	274,96	280,32	286,15	289,10	292,12	295,99	300,60	305,90	311,64	317,90
	4.8	228,46	245,85	258,18	265,79	270,80	274,93	279,51	284,94	290,82	293,80	296,83	300,74	305,40	316,57	310,76	322,90

Tabla 3 valores de K_I para la grieta pasante en función de las geometrías de ambas grietas

		GRIETA PASANTE															
GRIETA DE ESQUINA	longitud de grieta(mm)	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2	2.3	2.6	2.9	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.7	5
	0.2	162.47	165.10	168.13	171.33	174.47	177.63	180.73	183.90	187.07	190.33	193.70	197.30	201.10	204.67	208.17	211.60
	0.4	136.26	138.44	140.99	143.67	146.34	148.99	151.62	154.25	156.91	159.63	162.45	165.47	171.64	168.66	174.56	177.43
	0.6	172.39	175.13	178.33	181.69	185.02	188.34	191.66	194.97	198.30	201.75	205.26	209.12	213.10	216.86	220.53	224.16
	0.8	156.24	158.69	161.57	164.58	167.57	170.55	173.51	176.47	179.48	182.55	185.71	189.14	192.71	196.09	199.38	202.62
	1	159.14	161.61	164.53	167.54	170.56	173.58	176.57	179.57	182.58	185.68	188.89	192.33	195.96	199.36	202.66	205.94
	1.2	168.86	171.45	174.47	177.65	180.79	183.95	187.06	190.18	193.34	196.59	199.92	203.55	207.32	210.90	214.37	217.79
	1.4	191.02	193.92	197.32	200.88	204.40	207.92	211.43	214.95	218.48	222.15	225.90	229.97	234.23	238.25	242.15	246.02
	1.6	191.19	194.04	197.40	200.92	204.40	207.89	211.38	214.83	218.34	221.96	225.69	229.71	233.93	237.91	241.79	245.63
	1.8	198.44	201.35	204.80	208.39	211.97	215.53	219.10	222.65	226.25	229.95	233.78	237.91	242.24	246.33	250.30	254.23
	2	196.41	199.27	202.62	206.12	209.62	213.09	216.59	220.05	223.56	227.18	230.91	234.95	239.18	243.18	247.07	250.92
	2.2	211.15	214.18	217.75	221.49	225.20	228.91	232.64	236.34	240.08	243.95	247.92	252.26	256.78	261.06	265.22	269.35
	2.4	210.98	213.97	217.50	221.18	224.86	228.54	232.22	235.88	239.60	243.43	247.38	251.68	256.17	260.41	264.55	268.65
	2.6	204.10	206.96	210.33	213.83	217.35	220.85	224.36	227.85	231.40	235.06	238.83	242.92	247.21	251.27	255.23	259.14
	2.8	212.33	215.27	218.74	222.35	225.97	229.58	233.19	236.81	240.47	244.25	248.14	252.36	256.80	261.00	265.09	269.13
	3	225.47	228.59	232.26	236.10	239.92	243.76	247.60	251.42	255.32	259.33	263.46	267.95	272.68	277.13	281.48	285.78
	3.2	240.04	243.33	247.21	251.26	255.31	259.37	263.44	267.48	271.61	275.86	280.24	285.02	290.02	294.75	299.37	303.94
	3.4	246.11	249.48	253.44	257.60	261.73	265.89	270.04	274.18	278.40	282.76	287.24	292.13	297.24	302.10	306.81	311.49
	3.6	242.41	245.70	249.58	253.64	257.69	261.75	265.82	269.88	274.01	278.27	282.67	287.46	292.47	297.22	301.83	306.42
	3.8	257.77	261.25	265.37	269.67	273.96	278.29	282.61	286.94	291.33	295.87	300.56	305.66	311.00	316.08	321.02	325.93
	4	226.85	229.91	233.53	237.32	241.11	244.91	248.74	252.53	256.41	260.42	264.55	269.05	273.77	278.24	282.58	286.91
	4.2	225.65	228.71	232.30	236.08	239.85	243.63	247.42	251.21	255.05	259.04	263.14	267.61	272.30	276.74	281.07	285.35
	4.4	234.15	237.31	241.05	244.96	248.88	252.80	256.73	260.68	264.67	268.81	273.09	277.73	282.60	287.22	291.72	296.19
	4.6	229.50	232.55	236.17	239.95	243.74	247.52	251.33	255.14	259.02	263.03	267.16	271.67	276.40	280.87	285.25	289.58
	4.8	236.34	239.51	243.24	247.17	251.09	255.03	258.97	262.92	266.94	271.10	275.39	280.06	284.95	289.60	294.12	298.61

Tabla 4 valores de K_I para la grieta de esquina en función de las geometrías de ambas grietas

Al post procesar los resultados se observa que para longitudes de grieta de esquina menores que 0.8 mm y mayores que 3.8 mm, los resultados obtenidos no son buenos, pues presentan una desviación muy grande en función del nodo y del contorno que se estudie. Por lo que, aunque se presentan sus K_I en las tablas anteriores, a la hora de comparar con los valores analíticos estas geometrías se omiten.

Se ha de tener en cuenta que los resultados que aparecen en las tablas son una media de los resultados obtenidos en los nodos que se encuentran en el frente de grieta dentro de un ángulo menor a 10° , tomando como 0° la superficie de la placa. Esto es así porque a la hora de analizar los resultados obtenidos en la superficie se observan anomalías. Estas anomalías se deben a que el programa no identifica la frontera del material, por lo que toma zonas vacías y esto hace que el resultado no sea válido.

Para los valores de longitud de grieta menor que 0.8, los valores no son representativos ya que aunque la malla tiene elementos de un tamaño recomendado, estos no son lo suficiente sensibles para dar valores aceptables. En cambio el hecho de que los valores mayores de 3.8mm no sean representativos no es debido a la sensibilidad de la malla, sino que debido a la disminución de la rigidez de la placa, por el aumento de la grieta, se producen deformaciones muy grandes en la placa que hacen que su geometría no se ajuste a la configuración que se pretende estudiar.

Con las limitaciones antes mencionadas, y a partir de los valores de las tablas aceptables, se realizan unas gráficas que presentan el valor de K_I frente al tamaño de la grieta pasante y K_I frente al tamaño de la grieta de esquina.

En las graficas se llama “ge” a la longitud de grieta en esquina, y “gp” a la longitud de grieta pasante.

4.3.1 K_I con respecto a la profundidad de grieta pasante

En los dos siguientes gráficos se muestran los valores del factor de intensidad de tensiones para cada una de las grietas con respecto a la profundidad de la grieta pasante

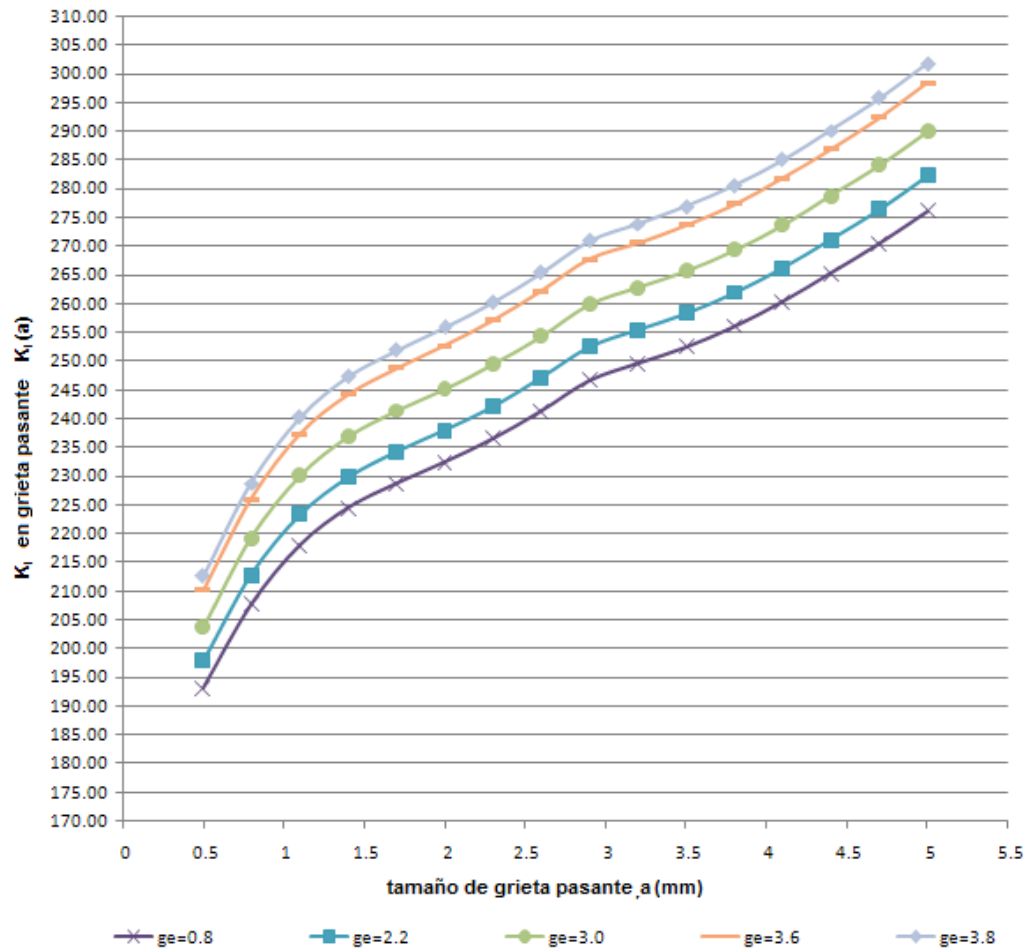


Figura 38 valores de K_I de la grieta pasante

Como se busca comparar las tendencias que siguen los valores de K_I solo se han representado algunas geometrías concretas. Se han elegido geometrías de grieta de esquina representativas. Esto se puede realizar que la tendencia es la misma independientemente de la geometría que en lo único que afecta es en el aumento del valor inicial de K_I

Se puede apreciar que las líneas comparten una tendencia que se podría aproximar a una función lineal, Y tienen una tendencia similar a las líneas de la **Figura 34**.

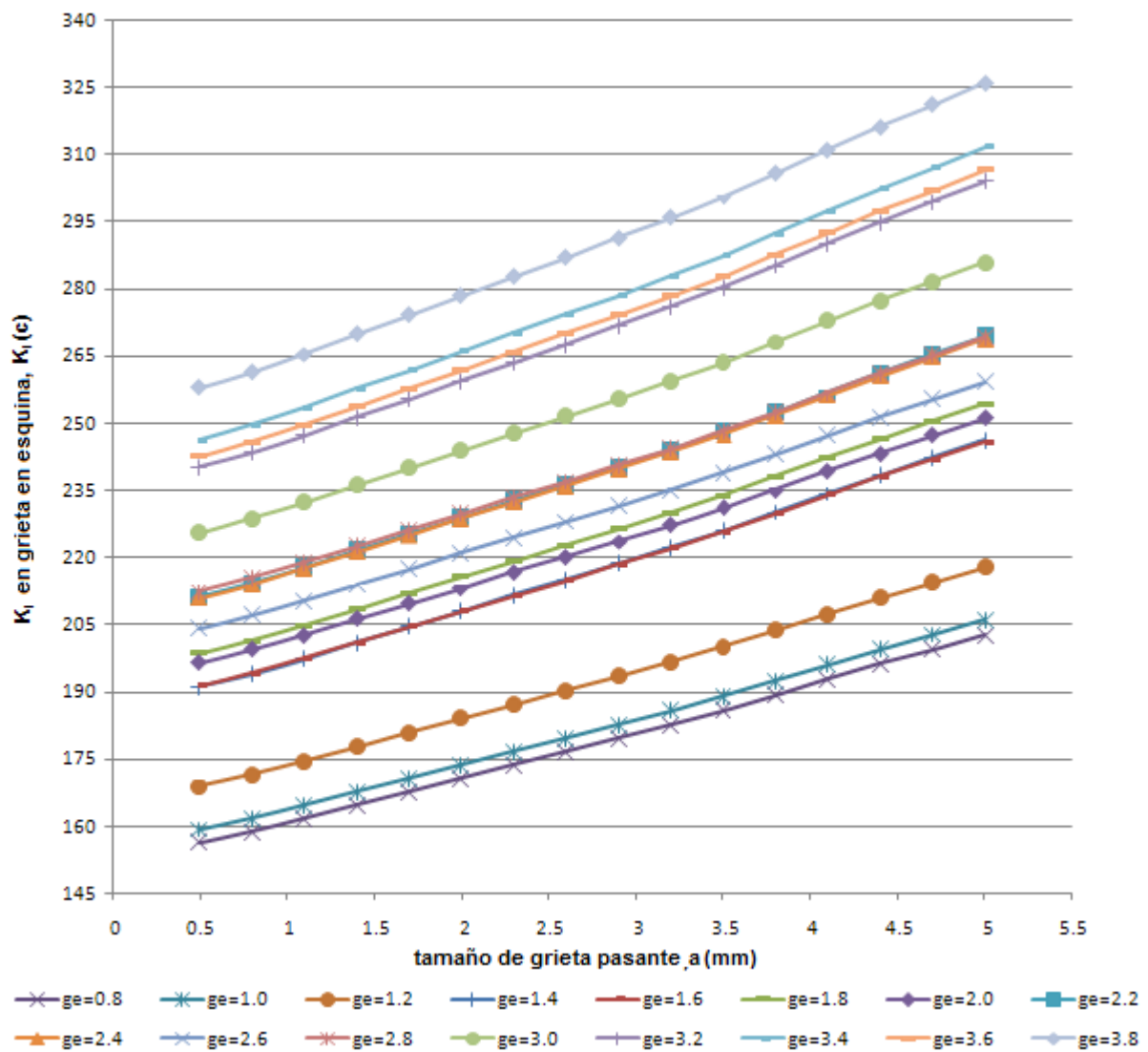


Figura 39 Valores de K_I de la grieta en esquina

Se aprecia que en la grieta de esquina el valor de K_I crece con una función lineal, que va aumentando su pendiente a medida que va creciendo la longitud de la grieta de esquina.

4.3.2 K_I con respecto la profundidad de grieta de esquina

En los dos siguientes gráficos se muestran los valores del factor de intensidad de tensiones para cada una de las grietas con respecto a la profundidad de la grieta de esquina

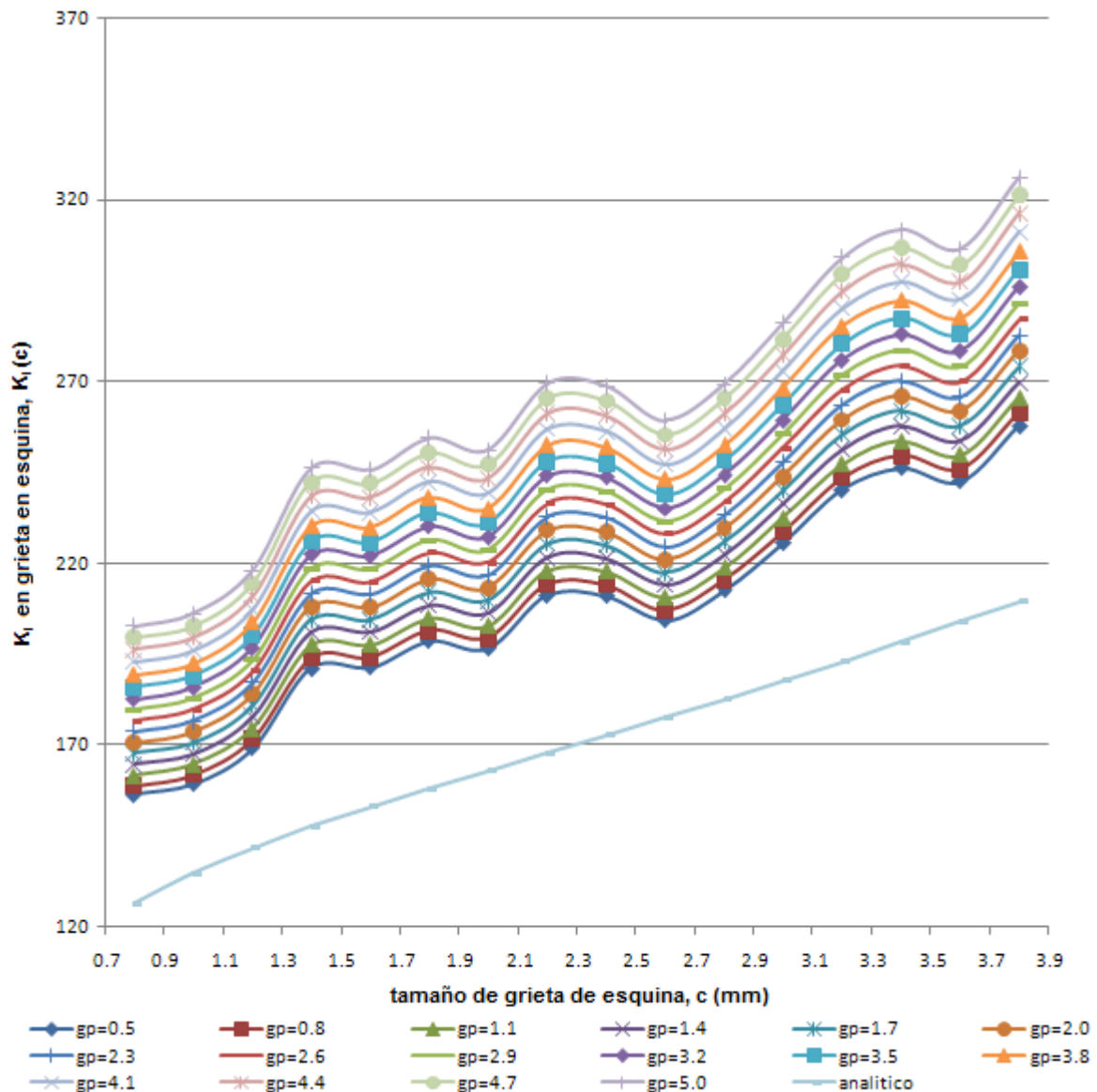


Figura 40 valores de K_I de la grieta en esquina

En la **Figura 40** aunque se presentan unas ondulaciones, se ve que la tendencia que siguen se aproxima mucho a la línea inferior que representa la tendencia de los valores analíticos para el mismo estudio.

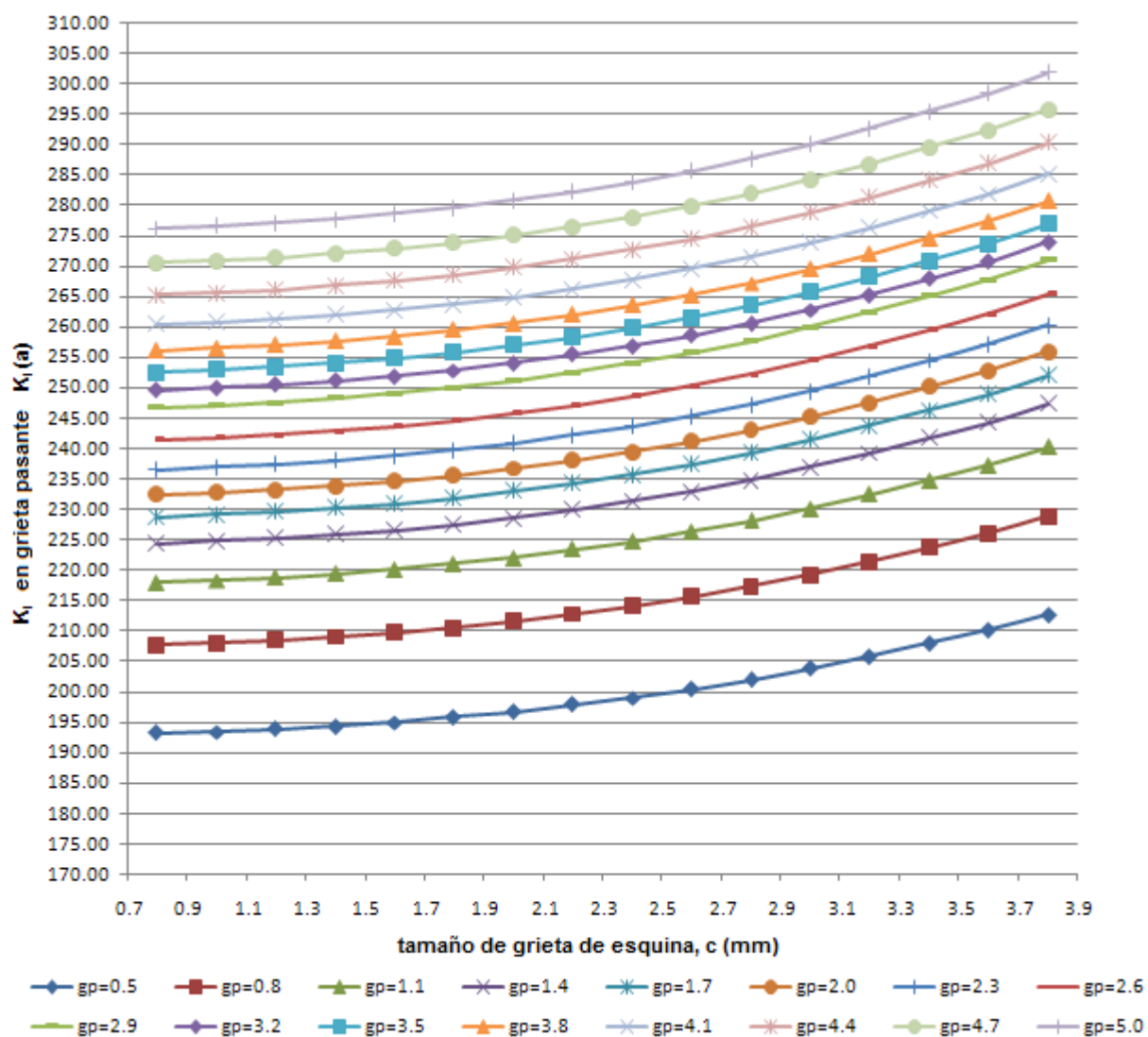


Figura 41 valores de K_I de la grieta pasante

Se puede observar la tendencia polinómica de grado dos en los valores de K_I . Es remarcable el hecho de que a medida que crece la grieta pasante, el incremento de K_I entre los puntos inicial y final es mayor.

Como los resultados obtenidos en los métodos numéricos presentan un incremento de casi un 20% frente a los analíticos, se debe comprobar si estos valores son aceptables.

El caso en más desfavorable, o con K_I más alto es el caso en el que existen dos grietas pasantes. El más deseable por ser el más favorable es en el que el agujero tiene dos grietas de esquina. Para que los resultados obtenidos de la herramienta sean válidos han de estar entre los dos casos anteriores.

Para comprobar la validez de los valores presentamos la siguiente gráfica:

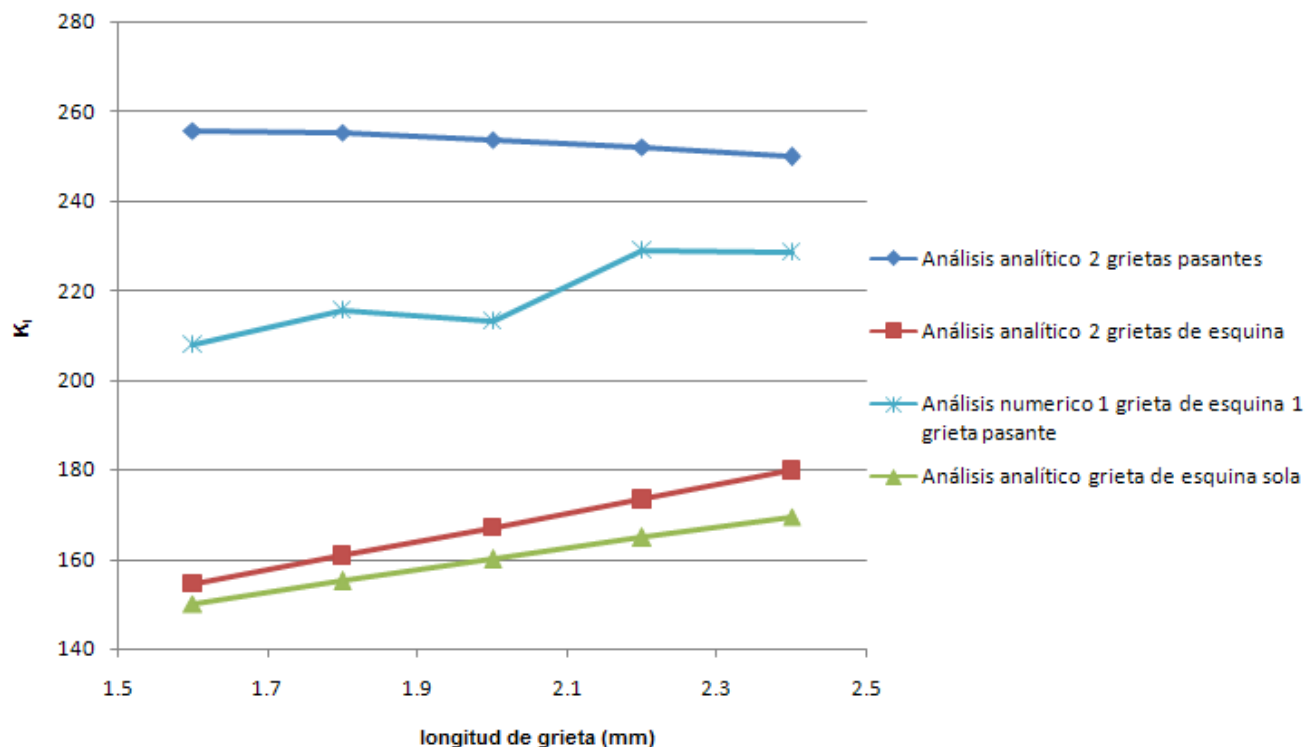


Figura 42 Comparación de valores de K_I para distintas geometrías

En la **Figura 42** se demuestra que los valores del método numérico, pese a ser altos, están entre los márgenes establecidos (valor crítico máximo 2 grietas pasantes, valor crítico mínimo 2 grietas de esquina) por lo que son válidos.

Es de gran importancia explicar que se presenta un rango de longitud de grieta representativo. Si se desea un estudio más detallado para cada geometría concreta se puede obtener comparando los resultados presentados en la Tabla 3 y la Tabla 4. Siendo consciente de que los resultados para grietas de esquina por debajo de 0.8mm y por encima de 3.8 mm no son analizables, como se ha explicado en apartados anteriores.

Como se puede observar en las siguientes figuras, en el frente de las grietas es donde más tensión se concentra por lo que se puede asumir que los resultados son coherentes con la metodología usada y las hipótesis se demuestran ciertas.

Es remarcable el hecho de que las tensiones máximas se den en el eje Z de la grieta de esquina, siendo esta un cuarto de círculo. Esto se debe a que la distancia al final del material es mayor en el eje Y que en el eje Z, por lo que el área por el que se distribuye la fuerza es mayor generando menor tensión en el punto del frente de grieta que se encuentra en el eje Y.

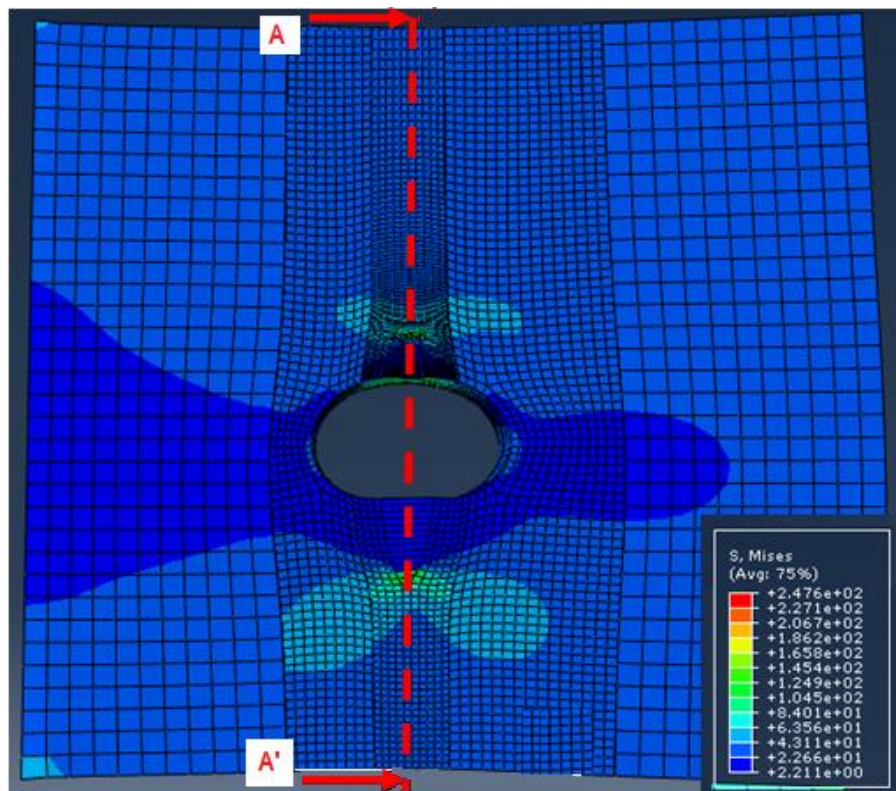


Figura 43 Diagrama de tensiones en el modelo

Como en la **Figura 43** no se aprecian las tensiones en los frentes de grieta, en la **Figura 44** se ha partido la placa por la mitad para poder apreciar correctamente estas tensiones. Obsérvese que la geometría de las grietas está resaltada.

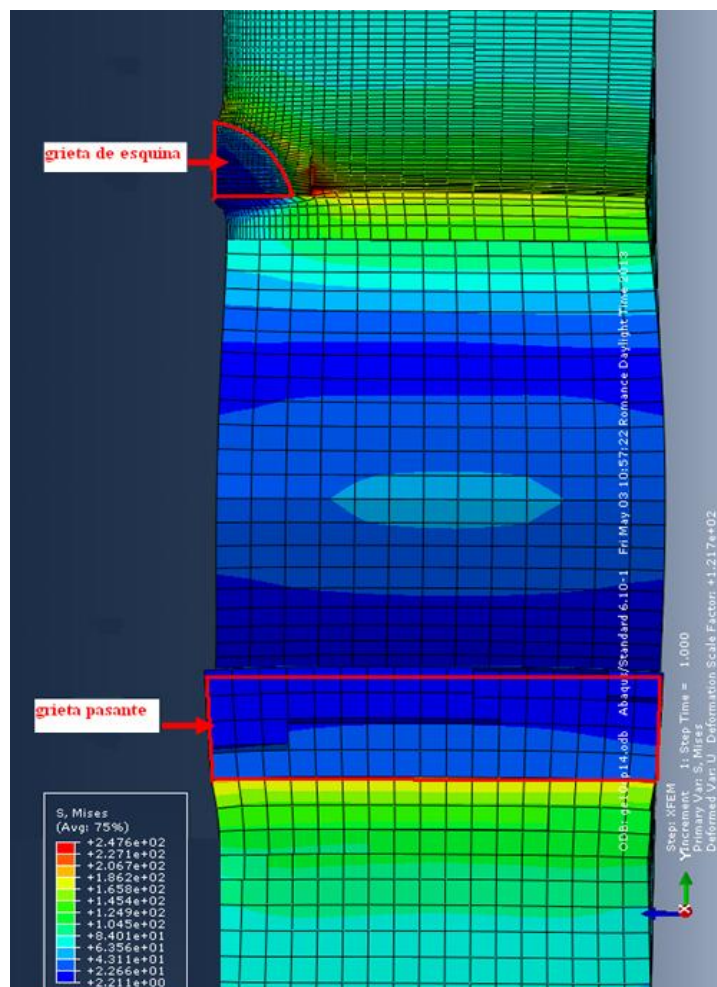


Figura 44 Sección A-A'

5 CONCLUSIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

- La modelización de elementos con fisuras en Abaqus no es totalmente exacta pues depende de un gran número de parámetros.
- Para la medida de deformaciones, y tensiones en el método de elementos finitos, es mejor usar Hexaedros (modelos 3D), o Quads (modelos 2D), pues al usar elementos Tetraédricos o Triangulares, se aumenta la rigidez y nos da valores más conservadores y menos reales. Para conseguir Hexaedros estructurados en algunas geometrías curvadas, se necesita realizar particiones para fijar líneas en las que se basen las direcciones de los elementos.
- A la hora de obtener resultados en el método analítico se adquieren datos más conservadores que con el método numérico. Esto, depende de para qué, puede ser deseable, pues al no tener en cuenta los defectos en el material, el método numérico puede dar valores muy optimistas. Pero si se usan los datos analíticos se corre el riesgo de sobredimensionar los elementos lo que no es deseable desde un punto de vista práctico y económico. Por lo que los ensayos reales son deseables y a partir de estos datos se podría determinar que método se ajusta más a los resultados experimentales.
- Para grietas de esquina muy grandes se produce mucha deformación en la geometría de la placa, lo que hace que los resultados no sean aceptables. Por ello a la hora de aplicar la carga se debería definir una geometría 2D rígida que se uniría sobre la cara que se aplica actualmente la carga y así evitar tanta deformación de la placa.
- Durante el procesado de los resultados obtenidos en estudio numérico, se ha apreciado que los valores de K_I en los nodos que se encuentran en la superficie no dan unos resultados reales, pues el programa no realiza los cálculos de forma correcta en el contorno del material. Por lo tanto los resultados presentados son una media de los obtenidos por los nodos que se encuentran en el frente de grieta.

5.2 Trabajos futuros:

La subrutina descrita en este documento está abierta a varias modificaciones, así como el estudio analítico. En la siguiente lista se proponen algunos trabajos que se pueden realizar a partir de los resultados obtenidos en este trabajo.

- Para la misma geometría realizar el ensayo real: con los resultados obtenidos en ese ensayo, se podría comparar los resultados analíticos los obtenidos por Abaqus, y se determinaría cuanto error aporta el hecho de que se haya hecho la suposición de que la probeta está hecha de un material perfecto (sin inclusiones, microfisuras, cavidades, etc.).
- Perfeccionar la subrutina: Realizar mejoras en la programación para conseguir tiempos de cálculo menores.
También se puede programar que el incremento de la grieta de esquina no sea homogéneo, consiguiendo así que el análisis sea más completo.
- Cambiar los modos de estudio: en este documento sólo se ha hecho el estudio para el Modo I, por lo que podría modificarse la herramienta para meter modos distintos de carga, que nos den resultados de los Modos II y III para obtener el estudio completo de la placa.

BIBLIOGRAFÍA

- REF (1).** J. San Millán Fiel, I. J. Armendáriz, A. García Martínez, Salamanca, F. Martín de la Escalera “SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DEL COMPORTAMIENTO EN TOLERANCIA AL DAÑO DE ESTRUCTURAS AERONÁUTICAS”. Octavo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (<http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/08/08-11.pdf>) (Última visita: Mayo 2013).
- REF (2).** Instrucción E.A.E. Capítulo XI. Artículo 42º. “ESTADO LÍMITE DE FATIGA”. (http://www.uclm.es/area/ing_rural/Normativa/EAE/capitulo11.pdf) (Última visita: Mayo 2013)
- REF (3).** C.P. Buckley. “Material Failure”. Lecture Notes (2005), University of Oxford.
- REF (4).** T.L. Anderson, “Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications” (1995) CRC Press.
- REF (5).** J.L. Arana J.J. González, “Mecánica de Fractura” (2002), Publicaciones de la Universidad del País Vasco.
- REF (6).** Raúl González Duque. Creative Commons Reconocimiento 2.5 España. “Phyton para todos” (<http://mundogeek.net/tutorial-phyton/>) (última visita: Febrero 2013)
- REF (7).** Y. Uzcátegui Flores. Centro Nacional de Cálculo Científico Universidad de los Andes. “ABAQUS PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS”. Mérida (Venezuela). (http://www.cecalc.ula.ve/documentacion/tutoriales/abaqus/introduccion_abaqus.pdf) (Última visita: Abril 2013)
- REF (8).** Dassault Systèmes. Simulia. “Abaqus/CAE User’s Manual” & “Abaqus Analysis User’s Manual”.
- REF (9).** Dassault Systèmes. Simulia. PRINCIPIA Ingenieros Consultores. “Modeling Fracture and Failure with Abaqus”. (2006).
- REF (10).** Jose Pedro García Sabater y Gonçal Bravo i Reig. “Manual de Visual Basic para Excel”. (<http://www.mundomanuales.com/manuales/3343.pdf>) (última visita Abril 2013)
- REF (11).** J. Zahr y J.L. Pérez Castellanos. “EL MEF EN PROBLEMAS DE FRACTURA”. Apuntes asignatura: El método de los elementos finitos en la mecánica de sólidos. Máster en Mecánica Industrial (2012/2013)
- REF (12).** J. A. Loya. “MECÁNICA DE FRACTURA LINEAL Y ELÁSTICA”. Apuntes asignatura: Estabilidad e Integridad Estructural. Máster en Mecánica Industrial (2012/2013)
- REF (13).** IHS. “Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of metallic material”. ATSM-E399-06^{e1}. West Conshohocken: IHS, 2007.
- REF (14).** National Aeronautics and Space Administration (NASA). “FATIGUE CRACK GROWTH COMPUTER PROGRAM ‘NASGRO’ VERSION 3.0, REFERENCE MANUAL” (2001)
- REF (15).** Normas privadas de Atos Spain S.A. Engineering Solutions (2013)

ANEXO

CODIGO DE LA SUBROUTINA CREADA PARA EL ESTUDIO NUMÉRICO

```
# -*- coding: mbcs -*-
```

```
# from driverUtils import executeOnCaeGraphicsStartup
# executeOnCaeGraphicsStartup()
from abaqus import *
from abaqusConstants import *
from caeModules import *
from driverUtils import executeOnCaeStartup
from odbAccess import *
```

```
#####
##### VARIABLES #####
#####
```

```
##### Variables para la placa
```

```
espesor=5.0           # tiene que ser un numero real
XAgujero= 5.0         # coordenada X del centro
YAgujero= 15.0        # coordenada Y del centro
radio=3.2
RHOLE = radio
```

```
WTOT=((2.5*(2*radio))+1)*2      # Ancho de la placa asegura que la distancia a borde sea mayor
                                # de la requerida( Normativa)
```

```
L1=3.5                 # grieta izquierda
L2=6.5                 # grieta derecha
L3=L2-L1               # grieta de esquina
```

```
Lplaca2=L1+L2+L3
```

```
L=(WTOT-Lplaca2)/2      # Largo de las placas 1 y 3
```

```
verticeInflzq=((0, 0))    #
verticeInfDer=((L, 0))    # Vertices de
verticeSupDer=((L, WTOT)) # la Placa 1
verticeSuplqz=((0, WTOT)) #
```

```
verticeInflzq1=((0, 0))
verticeInfDer1=((12, 0))
verticeSupDer1=((12, WTOT))
verticeSuplqz1=((0, WTOT))
```

```
verticeInflzq2=((0, 0))    #
verticeInfDer2=((L, 0))    # Vertices de
verticeSupDer2=((L, WTOT)) # la Placa 3
verticeSuplqz2=((0, WTOT)) #
```



```

rectangulo=((verticeInflzq), (verticeInfDer), (verticeSupDer), (verticeSuplq), (verticeInflzq))

rectangulo1=((verticeInflzq1), (verticeInfDer1), (verticeSupDer1), (verticeSuplq1), (verticeInflzq1))

rectangulo2=((verticeInflzq2), (verticeInfDer2), (verticeSupDer2), (verticeSuplq2), (verticeInflzq2))

##### Variables para la grieta pasante

ap= 0.5                                #Profundidad de grieta
grietaPasante=((-0.1, -0.1), ((espesor+0.1), -0.1), ((espesor+0.1), (ap+0.1)), (-0.1, (ap+0.1)), (-0.1,-
0.1))

##### Variables para la grieta de esquina

ae= 0.2                                # Profundidad de grieta

##### Variables para el Bulon

#RBOLT=RHOLE
#LB=espesor                            #longitud del Bulon sin tuerca ni cabeza
#RT=(2)*(RBOLT)                        #radio de la tuerca (PARA USAR UN MULTIPLICADOR TIENE QUE
SER UNA VARIABLE ENTERA)
#LT=1.0                                #longitud vertical de la tuerca
#LC=LT                                  #longitud vertical de la cabeza
#PERFILBULON=((0.0, 0.0), (RT, 0.0), (RT, LT), (RBOLT, LT), (RBOLT, LT+LB), (RT, LB), (RT,
LT+LB+LC/2), (RBOLT, LT+LB+LC), (0, LT+LB+LC), (0, 0))

##### Variables para las particiones

particion1=((0.0, 0.0), (0.0, YAgujero), (L, YAgujero),(L,0.0), (0.0, 0.0))

particion2=((0.0, 0.0), (0.0, YAgujero), (Lplaca2, YAgujero),(Lplaca2,0.0), (0.0, 0.0))

particion3=((0.0, 0.0), (0.0, YAgujero), (3.5, YAgujero),(3.5,0.0), (0.0, 0.0))

particion4=((0.0, 0.0), (0.0, YAgujero), (33.0, YAgujero),(33.0,0.0), (0.0, 0.0))

##### Propiedades del material (Al 7050 T7451)

EAI = 71020.0                          # Modulo de Young de la placa (dato)
NUAI = 0.33                            # Modulo de Poisson de la placa (dato)
#####
KAI = 100.0                            # Tenacidad a fractura del placa (alrededor de 1000
MPa.Vmm para aluminios) (dato)
GAI = (1-NUAI**2)*KAI**2/EAI           # Energia de fractura
#####
SYAI = 461.7                          # Esfuerzo de fluencia a traccion.

```

Cargas aplicadas a la placa

Fapl=-50.0 #Fuerza aplicada a la placa (es negativa para que traccione)

MALLADO

SM13=1.0 # tamaño de los elementos de las placas 1 y 3
 SM=0.4 # tamaño de los elementos de la malla de transicion
 SMmax=espesor/10 # tamaño de los elementos maximo
 SMmin=ae/10 # tamaño de los elementos minimo

VARIABLES PARA LOS BUCLES

n=0
 inc=0.2
 NINC = 100 # numero de incrementos (NINC=espesor/inc) no puedo poner esto
 porque tiene que ser un numero entero

incp= 0.3

VARIABLES PARA LOS BUCLES

myjob=('ge02gp05','ge02gp08','ge02gp11','ge02gp14','ge02gp17','ge02gp20',
 'ge02gp23','ge02gp26','ge02gp29','ge02gp32','ge02gp35','ge02gp38',
 'ge02gp41','ge02gp44','ge02gp47','ge02gp50','ge04gp05','ge04gp08',
 'ge04gp11','ge04gp14','ge04gp17','ge04gp20','ge04gp23','ge04gp26',
 'ge04gp29','ge04gp32','ge04gp35','ge04gp38','ge04gp44','ge04gp41',
 'ge04gp47','ge04gp50','ge06gp05','ge06gp08','ge06gp11','ge06gp14',
 'ge06gp17','ge06gp20','ge06gp23','ge06gp26','ge06gp29','ge06gp32',
 'ge06gp35','ge06gp38','ge06gp41','ge06gp44','ge06gp47','ge06gp50',
 'ge08gp05','ge08gp08','ge08gp11','ge08gp14','ge08gp17','ge08gp20',
 'ge08gp23','ge08gp26','ge08gp29','ge08gp32','ge08gp35','ge08gp38',
 'ge08gp41','ge08gp44','ge08gp47','ge08gp50','ge10gp05','ge10gp08',
 'ge10gp11','ge10gp14','ge10gp17','ge10gp20','ge10gp23','ge10gp26',
 'ge10gp29','ge10gp32','ge10gp35','ge10gp38','ge10gp41','ge10gp44',
 'ge10gp47','ge10gp50','ge12gp05','ge12gp08','ge12gp11','ge12gp14',
 'ge12gp17','ge12gp20','ge12gp23','ge12gp26','ge12gp29','ge12gp32',
 'ge12gp35','ge12gp38','ge12gp41','ge12gp44','ge12gp47','ge12gp50',
 'ge14gp05','ge14gp08','ge14gp11','ge14gp14','ge14gp17','ge14gp20',
 'ge14gp23','ge14gp26','ge14gp29','ge14gp32','ge14gp35','ge14gp38',
 'ge14gp41','ge14gp44','ge14gp47','ge14gp50','ge16gp05','ge16gp08',
 'ge16gp11','ge16gp14','ge16gp17','ge16gp20','ge16gp23','ge16gp26',
 'ge16gp29','ge16gp32','ge16gp35','ge16gp38','ge16gp41','ge16gp44',
 'ge16gp47','ge16gp50','ge18gp05','ge18gp08','ge18gp11','ge18gp14',
 'ge18gp17','ge18gp20','ge18gp23','ge18gp26','ge18gp29','ge18gp32',
 'ge18gp35','ge18gp38','ge18gp41','ge18gp44','ge18gp47','ge18gp50',
 'ge20gp05','ge20gp08','ge20gp11','ge20gp14','ge20gp17','ge20gp20',
 'ge20gp23','ge20gp26','ge20gp29','ge20gp32','ge20gp35','ge20gp38',
 'ge20gp41','ge20gp44','ge20gp47','ge20gp50','ge22gp05','ge22gp08',
 'ge22gp11','ge22gp14','ge22gp17','ge22gp20','ge22gp23','ge22gp26',
 'ge22gp29','ge22gp32','ge22gp35','ge22gp38','ge22gp41','ge22gp44',
 'ge22gp47','ge22gp50','ge24gp05','ge24gp08','ge24gp11','ge24gp14',

```
'ge24gp17','ge24gp20','ge24gp23','ge24gp26','ge24gp29','ge24gp32',
'ge24gp35','ge24gp38','ge24gp41','ge24gp44','ge24gp47','ge24gp50',
'ge26gp05','ge26gp08','ge26gp11','ge26gp14','ge26gp17','ge26gp20',
'ge26gp23','ge26gp26','ge26gp29','ge26gp32','ge26gp35','ge26gp38',
'ge26gp41','ge26gp44','ge26gp47','ge26gp50','ge28gp05','ge28gp08',
'ge28gp11','ge28gp14','ge28gp17','ge28gp20','ge28gp23','ge28gp26',
'ge28gp29','ge28gp32','ge28gp35','ge28gp38','ge28gp41','ge28gp44',
'ge28gp47','ge28gp50','ge30gp05','ge30gp08','ge30gp11','ge30gp14',
'ge30gp17','ge30gp20','ge30gp23','ge30gp26','ge30gp29','ge30gp32',
'ge30gp35','ge30gp38','ge30gp41','ge30gp44','ge30gp47','ge30gp50',
'ge32gp05','ge32gp08','ge32gp11','ge32gp14','ge32gp17','ge32gp20',
'ge32gp23','ge32gp26','ge32gp29','ge32gp32','ge32gp35','ge32gp38',
'ge32gp41','ge32gp44','ge32gp47','ge32gp50','ge34gp05','ge34gp08',
'ge34gp11','ge34gp14','ge34gp17','ge34gp20','ge34gp23','ge34gp26',
'ge34gp29','ge34gp32','ge34gp35','ge34gp38','ge34gp41','ge34gp44',
'ge34gp47','ge34gp50','ge36gp05','ge36gp08','ge36gp11','ge36gp14',
'ge36gp17','ge36gp20','ge36gp23','ge36gp26','ge36gp29','ge36gp32',
'ge36gp35','ge36gp38','ge36gp41','ge36gp44','ge36gp47','ge36gp50',
'ge38gp05','ge38gp08','ge38gp11','ge38gp14','ge38gp17','ge38gp20',
'ge38gp23','ge38gp26','ge38gp29','ge38gp32','ge38gp35','ge38gp38',
'ge38gp41','ge38gp44','ge38gp47','ge38gp50','ge40gp05','ge40gp08',
'ge40gp11','ge40gp14','ge40gp17','ge40gp20','ge40gp23','ge40gp26',
'ge40gp29','ge40gp32','ge40gp35','ge40gp38','ge40gp41','ge40gp44',
'ge40gp47','ge40gp50','ge42gp05','ge42gp08','ge42gp11','ge42gp14',
'ge42gp17','ge42gp20','ge42gp23','ge42gp26','ge42gp29','ge42gp32',
'ge42gp35','ge42gp38','ge42gp41','ge42gp44','ge42gp47','ge42gp50',
'ge44gp05','ge44gp08','ge44gp11','ge44gp14','ge44gp17','ge44gp20',
'ge44gp23','ge44gp26','ge44gp29','ge44gp32','ge44gp35','ge44gp38',
'ge44gp41','ge44gp44','ge44gp47','ge44gp50','ge46gp05','ge46gp08',
'ge46gp11','ge46gp14','ge46gp17','ge46gp20','ge46gp23','ge46gp26',
'ge46gp29','ge46gp32','ge46gp35','ge46gp38','ge46gp41','ge46gp44',
'ge46gp47','ge46gp50','ge48gp05','ge48gp08','ge48gp11','ge48gp14',
'ge48gp17','ge48gp20','ge48gp23','ge48gp26','ge48gp29','ge48gp32',
'ge48gp35','ge48gp38','ge48gp41','ge48gp44','ge48gp47','ge48gp50',
'final')
```

#####

Mdb()

```
#####
##### GEOMETRIA #####
#####
```

PLACA1

```
myModel= mdb.Model( name='Model-1')
p= myModel.ConstrainedSketch( name='Placa1', sheetSize=200.0)
```

```
for cont in range( len(rectangulo)-1) :
    p.Line(point1=rectangulo[cont], point2=rectangulo[cont+1])
```

PLACA2-GrietaPasante

```
a= myModel.ConstrainedSketch( name='PLACA2-GrietaPasante', sheetSize=200.0)
```

```
a.Line(point1=(L1, 12.17334119497949), point2=(L1, 0.0))
a.Line(point1=(L1, 0.0), point2=(L2, 0.0))
a.Line(point1=(L2, 0.0), point2=(L2, 12.17334119497949))
a.Arc3Points(point1=(L1, 12.17334119497949), point2=(L2, 12.17334119497949),
    point3=(5.0, 11.8))
```

PLACA2-GrietaEsquina

```
a1= myModel.ConstrainedSketch( name='PLACA2-GrietaEsquina', sheetSize=200.0)
```

```
a1.Line(point1=(L1, 17.8266588050205), point2=(L1, WTOT))
a1.Line(point1=(L1, WTOT), point2=(L2, WTOT))
a1.Line(point1=(L2, WTOT), point2=(L2, 17.8266588050205))
a1.Arc3Points(point1=(L1, 17.8266588050205), point2=(L2, 17.8266588050205),
    point3=(5.0, 18.2))
```

PLACA2-izquierda

```
a2= myModel.ConstrainedSketch( name='PLACA2-izquierda', sheetSize=200.0)
```

```
a2.Line(point1=(L1, 17.8266588050205), point2=(L1, WTOT))
a2.Line(point1=(L1, WTOT), point2=(0.0, WTOT))
a2.Line(point1=(0.0, WTOT), point2=(0.0, 0.0))
a2.Line(point1=(0.0, 0.0), point2=(L1, 0.0))
a2.Line(point1=(L1, 0.0), point2=(L1, 12.17334119497949))
a2.Arc3Points(point1=(L1, 12.17334119497949), point2=(L1, 17.8266588050205),
    point3=(1.8, YAgujero))
```

PLACA2-derecha

```
a3= myModel.ConstrainedSketch( name='PLACA2-derecha', sheetSize=200.0)
```

```
a3.Line(point1=(L2, 17.8266588050205), point2=(L2, WTOT))
a3.Line(point1=(L2, WTOT), point2=(Lplaca2, WTOT))
a3.Line(point1=(Lplaca2, WTOT), point2=(Lplaca2, 0.0))
a3.Line(point1=(Lplaca2, 0.0), point2=(L2, 0.0))
a3.Line(point1=(L2, 0.0), point2=(L2, 12.17334119497949))
a3.Arc3Points(point1=(L2, 12.17334119497949), point2=(L2, 17.8266588050205),
    point3=(8.2, YAgujero))
```

PLACA3

```

b= myModel.ConstrainedSketch( name='Placa3', sheetSize=200.0)

for cont in range( len(rectangulo2)-1) :
    b.Line(point1=rectangulo2[cont], point2=rectangulo2[cont+1])

##### BULON

#s=myModel.ConstrainedSketch( name='Bulon', sheetSize=200.0)
#s.ConstructionLine(point1=(0.0, -200.0), point2=(0.0, 200.0))
#for i in range( len(PERFILBULON)-1):
#    s.Line(point1=PERFILBULON[i], point2=PERFILBULON[i+1])

##### GRIETA PASANTE

g=myModel.ConstrainedSketch( name='Grieta Pasante', sheetSize=200.0)
for i in range( len(grietaPasante)-1) :
    g.Line(point1=grietaPasante[i], point2=grietaPasante[i+1])

##### GRIETA DE ESQUINA

ge=myModel.ConstrainedSketch( name=' Grieta Esquina', sheetSize=200.0)
ge.Line(point1=(0, 0), point2=(0, ae))
ge.Line(point1=(0, 0), point2=(ae, 0))
ge.ArcByCenterEnds(center=(0.0, 0.0), point1=(ae, 0.0), point2=(0.0, ae),
    direction=COUNTERCLOCKWISE)

#####
##### PART #####
#####

##### PLACA

myPart = myModel.Part(name='Plate',
    dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
myPart.BaseSolidExtrude(sketch=p, depth=espesor)

myPart1 = myModel.Part(name='Plate2-GrietaPasante',
    dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
myPart1.BaseSolidExtrude(sketch=a, depth=espesor)

myPart2 = myModel.Part(name='Plate2-GrietaEsquina',
    dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
myPart2.BaseSolidExtrude(sketch=a1, depth=espesor)

myPart3 = myModel.Part(name='Plate2-izquierda',

```

```

        dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
myPart3.BaseSolidExtrude(sketch=a2, depth=espesor)

myPart4 = myModel.Part(name='Plate2-derecha',
        dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
myPart4.BaseSolidExtrude(sketch=a3, depth=espesor)

myPart5 = myModel.Part(name='Plate3',
        dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
myPart5.BaseSolidExtrude(sketch=b, depth=espesor)
##### BULON

#b = myModel.Part(name='Bolt',
#        dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
#b.BaseSolidRevolve(sketch=s, angle=360.0, flipRevolveDirection=ON)

#### GRIETA PASANTE

gp = myModel.Part(name='GrietaPasante-1',
        dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
gp.BaseShell(sketch=g)

##### GRIETA DE ESQUINA

ges = myModel.Part(name='GrietaEsquina-1',
        dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
ges.BaseShell(sketch=ge)

#####

##### PARTICION PLACA1 #####

#####

##### FACE #####

p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']
f, e1, d = p.faces, p.edges, p.datums
t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[4], sketchUpEdge=e1[4],
        sketchPlaneSide=SIDE1, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='part. PLACA1',
        sheetSize=42.42, gridSpacing=1.06, transform=t)
g, v, d1, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)

for cont in range( len(particion1)-1) :
        s.Line(point1=particion1[cont], point2=particion1[cont+1])

p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']

```

```
f = p.faces
pickedFaces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#10 ]', ), )
e2, d2 = p.edges, p.datums
p.PartitionFaceBySketch(sketchUpEdge=e2[4], faces=pickedFaces, sketch=s)
s.unsetPrimaryObject()
del mdb.models['Model-1'].sketches['part. PLACA1']
```

CELL

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']
c = p.cells
pickedCells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
e1 = p.edges
pickedEdges =(e1[0], e1[1], e1[2], e1[3])
p.PartitionCellBySweepEdge(sweepPath=e1[9], cells=pickedCells,
    edges=pickedEdges)
```

```
#####
##### PARTICION PLACA2 #####
#####
```

FACE

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
f, e, d = p.faces, p.edges, p.datums
t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[6], sketchUpEdge=e[0],
    sketchPlaneSide=SIDE1, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__',
    sheetSize=41.82, gridSpacing=1.04, transform=t)
g, v, d1, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)
```

```
for cont in range( len(particion3)-1) :
    s.Line(point1=particion3[cont], point2=particion3[cont+1])
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
f = p.faces
pickedFaces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#40 ]', ), )
e1, d2 = p.edges, p.datums
p.PartitionFaceBySketch(sketchUpEdge=e1[0], faces=pickedFaces, sketch=s)
s.unsetPrimaryObject()
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
```

CELL

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
c = p.cells
```

```
pickedCells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
e1 = p.edges
pickedEdges =(e1[0], e1[1], e1[2], e1[3], e1[4])
p.PartitionCellBySweepEdge(sweepPath=e1[5], cells=pickedCells,
    edges=pickedEdges)
```

FACE

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
f1, e, d1 = p.faces, p.edges, p.datums
t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f1[6], sketchUpEdge=e[7],
    sketchPlaneSide=SIDE1, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='__profile__', sheetSize=47.7,
    gridSpacing=1.19, transform=t)
g, v, d, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)
```

```
for cont in range( len(particion2)-1) :
    s.Line(point1=particion2[cont], point2=particion2[cont+1])
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
f = p.faces
pickedFaces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#40 ]', ), )
e1, d2 = p.edges, p.datums
p.PartitionFaceBySketch(sketchUpEdge=e1[7], faces=pickedFaces, sketch=s)
s.unsetPrimaryObject()
del mdb.models['Model-1'].sketches['__profile__']
```

CELL

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
c = p.cells
pickedCells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
e = p.edges
pickedEdges =(e[0], e[10], e[13], e[16], e[19])
p.PartitionCellBySweepEdge(sweepPath=e[11], cells=pickedCells,
    edges=pickedEdges)
```

```
#####
##### PARTICION PLACA3 #####
#####
```

FACE


```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
f, e, d = p.faces, p.edges, p.datums
t = p.MakeSketchTransform(sketchPlane=f[4], sketchUpEdge=e[4],
    sketchPlaneSide=SIDE1, origin=(0.0, 0.0, 0.0))
s = mdb.models['Model-1'].ConstrainedSketch(name='part. PLACA3',
    sheetSize=77.82, gridSpacing=1.94, transform=t)
g, v, d1, c = s.geometry, s.vertices, s.dimensions, s.constraints
s.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s, filter=COPLANAR_EDGES)

for cont in range( len(particion4)-1) :
    s.Line(point1=particion4[cont], point2=particion4[cont+1])

p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
f = p.faces
pickedFaces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#10 ]', ), )
e1, d2 = p.edges, p.datums
p.PartitionFaceBySketch(sketchUpEdge=e1[4], faces=pickedFaces, sketch=s)
s.unsetPrimaryObject()
del mdb.models['Model-1'].sketches['part. PLACA3']
```

CELL

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
c = p.cells
pickedCells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
e = p.edges
pickedEdges =(e[0], e[1], e[2], e[3])
p.PartitionCellBySweepEdge(sweepPath=e[9], cells=pickedCells,
    edges=pickedEdges)
```


ASSEMBLY #####
#####

PLACA1

```
myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Placa-1', part=myPart,
    dependent=ON)
```

PLACA 2

```
myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-GrietaPasante', part=myPart1,
    dependent=ON)
```

```
#####
##### POSICIONAMIENTO #####
#####
```

```
myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-GrietaPasante', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
```

```
myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-GrietaEsquina', part=myPart2,
    dependent=ON)
```

```
#####
##### POSICIONAMIENTO #####
#####
```

```
myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-GrietaEsquina', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
```

```
myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-izquierda', part=myPart3,
    dependent=ON)
```

```
#####
##### POSICIONAMIENTO #####
#####
```

```
myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-izquierda', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
```

```
myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-derecha', part=myPart4,
    dependent=ON)
```

```
#####
##### POSICIONAMIENTO #####
#####
```

```
myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-derecha', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
```

PLACA3

```
myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Placa-3', part=myPart5,
    dependent=ON)
```

```
#####
##### POSICIONAMIENTO #####
#####
```

```
myAssembly.translate(instanceList=('Part Placa-3', ), vector=((L+Lplaca2), 0.0, 0.0))
```

GRIETA PASANTE

```
my2=myAssembly.Instance(name='Grieta Pasante', part=gp,
    dependent=ON)
```

```
#####
##### POSICIONAMIENTO #####
#####
```

```
myAssembly.rotate(instanceList=('Grieta Pasante', ), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0),
    axisDirection=(0.0, 1.0, 0.0), angle=90.0)
```

#: The instance Part Grieta was rotated by 0. degrees about the axis defined by the point 0., 0., 0. and the vector 0., 1., 0.

```
myAssembly.translate(instanceList=('Grieta Pasante', ), vector=((L+XAgujero), (YAgujero-(radio+ap)),
    espesor))
```

#: The instance Part Grieta was translated by 1., 500.E-03, 10. with respect to the assembly coordinate system

GRIETA ESQUINA

```
my3=myAssembly.Instance(name='Grieta Esquina', part=ges,
    dependent=ON)
```

```
#####
##### POSICIONAMIENTO #####
#####
```

```
myAssembly.rotate(instanceList=('Grieta Esquina', ), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0),
    axisDirection=(0.0, 1.0, 0.0), angle=90.0)
```

```
myAssembly.translate(instanceList=('Grieta Esquina', ), vector=((L+XAgujero), (YAgujero+radio),
    espesor))
```

```
#####
##### SET #####
#####
```

PLACA1

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']
c = p.cells
cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#3 ]', ), )
p.Set(cells=cells, name='placa1')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']
f = p.faces
faces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#102 ]', ), )
p.Set(faces=faces, name='encastre')
```

PLACA2

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaEsquina']
c = p.cells
cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
p.Set(cells=cells, name='grieta esquina')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaPasante']
c = p.cells
cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
p.Set(cells=cells, name='grieta pasante')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
c = p.cells
cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#3 ]', ), )
p.Set(cells=cells, name='derecha')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
c = p.cells
cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#3 ]', ), )
p.Set(cells=cells, name='izquierda')
```

PLACA3

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
c = p.cells
cells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#3 ]', ), )
p.Set(cells=cells, name='placa3')
```

GRIETA PASANTE

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['GrietaPasante-1']
f = p.faces
faces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
p.Set(faces=faces, name='grieta pasante')
```

GRIETA DE ESQUINA

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['GrietaEsquina-1']
f = p.faces
faces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
p.Set(faces=faces, name='grieta esquina')
```

SURFACES #####

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#48 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='placa1')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#82 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='placa2-3')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#82 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='placa2-1')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#20 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='derecha esquina')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#200 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='derecha pasante')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaEsquina']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#4 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='esquina derecha')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaEsquina']
```

```
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='esquina izquierda')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaPasante']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='pasante derecha')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaPasante']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#4 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='pasante izquierda')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#200 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='izquierda esquina')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#20 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='izquierda pasante')
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#102 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='placa3')
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
s = p.faces
side1Faces = s.getSequenceFromMask(mask=('[#48 ]', ), )
p.Surface(side1Faces=side1Faces, name='carga')
```

```
#####
##### MATERIAL #####
#####
```

```
mdb.models['Model-1'].Material(name='Al 7050 T7451')
mdb.models['Model-1'].materials['Al 7050 T7451'].Elastic(table=((EAl,
    NUA), ))
mdb.models['Model-1'].materials['Al 7050 T7451'].MaxpsDamageInitiation(tolerance=0.1,
table=((SYAl, ), ))
mdb.models['Model-1'].materials['Al 7050 T7451'].maxpsDamageInitiation.DamageEvolution(
    type=ENERGY, mixedModeBehavior=POWER_LAW, power=1.0, table=((GAl, GAl, GAl),
    ))
mdb.models['Model-1'].materials['Al 7050 T7451'].maxpsDamageInitiation.DamageStabilizationCohesive(
    cohesiveCoeff=1e-05)
```

7050

generamos las propiedades

```
mdb.models['Model-1'].HomogeneousSolidSection(name='Al7050', material='Al 7050 T7451',
thickness=None)
```

se aplican las propiedades a la placa

#placa 1

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']
region = p.sets['placa1']
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']
p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Al7050', offset=0.0,
offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField="",
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
```

#placa 2

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaEsquina']
region = p.sets['grieta esquina']
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaEsquina']
p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Al7050', offset=0.0,
offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField="",
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaPasante']
region = p.sets['grieta pasante']
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaPasante']
p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Al7050', offset=0.0,
offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField="",
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
region = p.sets['derecha']
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Al7050', offset=0.0,
offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField="",
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
session.viewports['Viewport: 1'].setValues(displayedObject=p)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
region = p.sets['izquierda']
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Al7050', offset=0.0,
offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField="",
thicknessAssignment=FROM_SECTION)
```

#placa3

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
region = p.sets['placa3']
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Al7050', offset=0.0,
    offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='',
    thicknessAssignment=FROM_SECTION)
```

```
#####
#####          STEP          #####
#####
```

```
mdb.models['Model-1'].StaticStep(name='XFEM', previous='Initial')
mdb.models['Model-1'].steps['XFEM'].control.setValues(allowPropagation=OFF,
    resetDefaultValues=OFF, discontinuous=ON, timeIncrementation=(8.0, 10.0, 9.0, 16.0, 10.0,
    4.0, 12.0, 20.0, 6.0, 3.0, 50.0))
```

```
#####
#####          INTERACTION          #####
#####
```

#####contacto

```
mdb.models['Model-1'].ContactProperty('noFric')
mdb.models['Model-1'].interactionProperties['noFric'].TangentialBehavior(formulation=FRICTIONLESS)
mdb.models['Model-1'].interactionProperties['noFric'].NormalBehavior(pressureOverclosure=HARD,
    allowSeparation=ON,
    constraintEnforcementMethod=DEFAULT)
```

TIES

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region1=a.instances['Part Placa-1'].surfaces['placa1']
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region2=a.instances['Part Plate2-izquierda'].surfaces['placa2-1']
mdb.models['Model-1'].Tie(name='Constraint-1', master=region1, slave=region2,
    positionToleranceMethod=COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
```

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region1=a.instances['Part Placa-3'].surfaces['placa3']
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region2=a.instances['Part Plate2-derecha'].surfaces['placa2-3']
mdb.models['Model-1'].Tie(name='Constraint-2', master=region1, slave=region2,
    positionToleranceMethod=COMPUTED, adjust=ON, tieRotations=ON, thickness=ON)
```



```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region1=a.instances['Part Plate2-GrietaEsquina'].surfaces['esquina derecha']
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region2=a.instances['Part Plate2-derecha'].surfaces['derecha esquina']
mdb.models['Model-1'].Tie(name='esquina derecha', master=region1,
    slave=region2, positionToleranceMethod=COMPUTED, adjust=ON,
    tieRotations=ON, thickness=ON)
```

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region1=a.instances['Part Plate2-GrietaEsquina'].surfaces['esquina izquierda']
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region2=a.instances['Part Plate2-izquierda'].surfaces['izquierda esquina']
mdb.models['Model-1'].Tie(name='esquina izquierda', master=region1,
    slave=region2, positionToleranceMethod=COMPUTED, adjust=ON,
    tieRotations=ON, thickness=ON)
```

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region1=a.instances['Part Plate2-GrietaPasante'].surfaces['pasante derecha']
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region2=a.instances['Part Plate2-derecha'].surfaces['derecha pasante']
mdb.models['Model-1'].Tie(name='pasante derecha', master=region1,
    slave=region2, positionToleranceMethod=COMPUTED, adjust=ON,
    tieRotations=ON, thickness=ON)
```

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region1=a.instances['Part Plate2-GrietaPasante'].surfaces['pasante izquierda']
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region2=a.instances['Part Plate2-izquierda'].surfaces['izquierda pasante']
mdb.models['Model-1'].Tie(name='pasante izquierda', master=region1,
    slave=region2, positionToleranceMethod=COMPUTED, adjust=ON,
    tieRotations=ON, thickness=ON)
```

```
#####
##### FISURAS #####
#####
```

```
##### GRIETA ESQUINA
```

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
crackDomain = a.instances['Part Plate2-GrietaEsquina'].sets['grieta esquina']
crackLocation = a.instances['Grieta Esquina'].sets['grieta esquina']
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a.engineeringFeatures.XFEMCrack(name='grieta esquina', crackDomain=crackDomain,
    interactionProperty='', allowCrackGrowth=False,
    crackLocation=crackLocation)
```

GRIETA PASANTE

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
crackDomain = a.instances['Part Plate2-GrietaPasante'].sets['grieta pasante']
crackLocation = a.instances['Grieta Pasante'].sets['grieta pasante']
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
a.engineeringFeatures.XFEMCrack(name='grieta pasante', crackDomain=crackDomain,
    interactionProperty='', allowCrackGrowth=False,
    crackLocation=crackLocation)
```


CARGA #####
#####

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region = a.instances['Part Placa-3'].surfaces['carga']
mdb.models['Model-1'].Pressure(name='Load-1', createStepName='XFEM',
    region=region, distributionType=UNIFORM, field='', magnitude=Fapl,
    amplitude=UNSET)
```


BC #####
#####

```
a = mdb.models['Model-1'].rootAssembly
region = a.instances['Part Placa-1'].sets['encastre']
mdb.models['Model-1'].EncastreBC(name='BC-1', createStepName='Initial',
    region=region)
```


MALLADO #####
#####

Se define la malla de transicion y la del resto de la placa

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']
p.seedPart(size=SM13, deviationFactor=0.1)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate']
p.generateMesh()
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
p.seedPart(size=SM, deviationFactor=0.1)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-derecha']
p.generateMesh()
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
p.seedPart(size=SM, deviationFactor=0.1)
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-izquierda']
p.generateMesh()
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
p.seedPart(size=SM13, deviationFactor=0.1)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate3']
p.generateMesh()
```

Se define la malla de la parte de la grieta

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaEsquina']
e = p.edges
pickedEdges1 = e.getSequenceFromMask(mask=('[#5 ]', ), )
pickedEdges2 = e.getSequenceFromMask(mask=('[#280 ]', ), )
p.seedEdgeByBias(biasMethod=SINGLE, end1Edges=pickedEdges1,
    end2Edges=pickedEdges2, minSize=SMmin, maxSize=SMmax, constraint=FINER)
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaEsquina']
e = p.edges
pickedEdges2 = e.getSequenceFromMask(mask=('[#12a ]', ), )
p.seedEdgeByBias(biasMethod=SINGLE, end2Edges=pickedEdges2, minSize=SMmin,
    maxSize=SMmax, constraint=FINER)
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaEsquina']
e = p.edges
pickedEdges = e.getSequenceFromMask(mask=('[#c50 ]', ), )
p.seedEdgeBySize(edges=pickedEdges, size=0.3, deviationFactor=0.1,
    constraint=FINER)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaEsquina']
p.generateMesh()
```

```
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaPasante']
p.seedPart(size=incp, deviationFactor=0.1)
p = mdb.models['Model-1'].parts['Plate2-GrietaPasante']
p.generateMesh()
```

```
#####
##### HISTORY OUTPUT #####
#####
```

#####GRIETA PASANTE

```
mdb.models['Model-1'].HistoryOutputRequest(name='PASANTE',
    createStepName='XFEM', contourIntegral='grieta pasante',
    sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE, numberOfContours=5,
    contourType=K_FACTORS)
```

#####GRIETA ESQUINA

```
mdb.models['Model-1'].HistoryOutputRequest(name='ESQUINA',
    createStepName='XFEM', contourIntegral='grieta esquina',
    sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE, numberOfContours=5,
    contourType=K_FACTORS)
```

```
#####
##### JOB #####
#####
```

```
mdb.Job(name=myjob[n], model='Model-1', description="", type=ANALYSIS,
    atTime=None, waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None, memory=80,
    memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True,
    explicitPrecision=SINGLE, nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF,
    modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF, userSubroutine="",
    scratch="", multiprocessingMode=DEFAULT, numCpus=10,numDomains=10)
```

```
#####
##### BUCLE 1 #####
#####
```

```
while ae <= (espesor-0.1):
```

```
    ap=0.5
    ge=myModel.ConstrainedSketch( name=' Grieta Esquina', sheetSize=200.0)
    ge.Line(point1=(0, 0), point2=(0, ae))
    ge.Line(point1=(0, 0), point2=(ae, 0))
    ge.ArcByCenterEnds(center=(0.0, 0.0), point1=(ae, 0.0), point2=(0.0, ae),
        direction=COUNTERCLOCKWISE)
    ges = myModel.Part(name='GrietaEsquina-1',
        dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
    ges.BaseShell(sketch=ge)
    myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
    myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Placa-1', part=myPart,
        dependent=ON)
    myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
    myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-GrietaPasante', part=myPart1,
        dependent=ON)
    myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-GrietaPasante', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
    myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
    myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-GrietaEsquina', part=myPart2,
        dependent=ON)
    myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-GrietaEsquina', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
    myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
    myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-izquierda', part=myPart3,
        dependent=ON)
    myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-izquierda', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
    myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
    myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-derecha', part=myPart4,
```

```

        dependent=ON)
myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-derecha', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Placa-3', part=myPart5,
        dependent=ON)
myAssembly.translate(instanceList=('Part Placa-3', ), vector=((L+Lplaca2), 0.0, 0.0))
my2=myAssembly.Instance(name='Grieta Pasante', part=gp,
        dependent=ON)
myAssembly.rotate(instanceList=('Grieta Pasante', ), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0),
        axisDirection=(0.0, 1.0, 0.0), angle=90.0)
myAssembly.translate(instanceList=('Grieta Pasante', ), vector=((L+XAgujero), (YAgujero-
        (radio+ap)), espesor))
my3=myAssembly.Instance(name='Grieta Esquina', part=ges,
        dependent=ON)
myAssembly.rotate(instanceList=('Grieta Esquina', ), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0),
        axisDirection=(0.0, 1.0, 0.0), angle=90.0)
myAssembly.translate(instanceList=('Grieta Esquina', ), vector=((L+XAgujero),
        (YAgujero+radio), espesor))
p = mdb.models['Model-1'].parts['GrietaEsquina-1']
f = p.faces
faces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
p.Set(faces=faces, name='grieta esquina')
#mdb.jobs[myjob[n]].submit(consistencyChecking=OFF)
#mdb.jobs[myjob[n]].waitForCompletion()
while ap <= (espesor):

    ges = myModel.Part(name='GrietaEsquina-1',
        dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
    ges.BaseShell(sketch=ge)
    g=myModel.ConstrainedSketch( name='Grieta Pasante', sheetSize=200.0)
    g.Line(point1=(-0.1, -0.1), point2=((espesor+0.1), -0.1))
    g.Line(point1=((espesor+0.1), -0.1), point2=((espesor+0.1), (ap+0.1)))
    g.Line(point1=((espesor+0.1), (ap+0.1)), point2=(-0.1, (ap+0.1)))
    g.Line(point1=(-0.1, (ap+0.1)), point2=(-0.1,-0.1))
    gp = myModel.Part(name='GrietaPasante-1',
        dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
    gp.BaseShell(sketch=g)
    myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
    myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Placa-1', part=myPart,
        dependent=ON)
    myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
    myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-GrietaPasante', part=myPart1,
        dependent=ON)
    myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-GrietaPasante', ), vector=(L, 0.0,
        0.0))
    myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
    myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-GrietaEsquina', part=myPart2,
        dependent=ON)
    myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-GrietaEsquina', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
    myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
    myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-izquierda', part=myPart3,

```

```

dependent=ON)
myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-izquierda', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
myAssembly= mdb.models['Model-1'].rootAssembly
myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Plate2-derecha', part=myPart4,
dependent=ON)
myAssembly.translate(instanceList=('Part Plate2-derecha', ), vector=(L, 0.0, 0.0))
myInstance= myAssembly.Instance(name='Part Placa-3', part=myPart5,
dependent=ON)
myAssembly.translate(instanceList=('Part Placa-3', ), vector=((L+Lplaca2), 0.0, 0.0))
my2=myAssembly.Instance(name='Grieta Pasante', part=gp,
dependent=ON)
myAssembly.rotate(instanceList=('Grieta Pasante', ), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0),
axisDirection=(0.0, 1.0, 0.0), angle=90.0)
myAssembly.translate(instanceList=('Grieta Pasante', ), vector=((L+XAgujero),
(YAgujero-(radio+ap)), espesor))
my3=myAssembly.Instance(name='Grieta Esquina', part=ges,
dependent=ON)
myAssembly.rotate(instanceList=('Grieta Esquina', ), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0),
axisDirection=(0.0, 1.0, 0.0), angle=90.0)
myAssembly.translate(instanceList=('Grieta Esquina', ), vector=((L+XAgujero),
(YAgujero+radio), espesor))

p = mdb.models['Model-1'].parts['GrietaPasante-1']
f = p.faces
faces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
p.Set(faces=faces, name='grieta pasante')
p = mdb.models['Model-1'].parts['GrietaEsquina-1']
f = p.faces
faces = f.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
p.Set(faces=faces, name='grieta esquina')
mdb.jobs[myjob[n]].submit(consistencyChecking=OFF)
mdb.jobs[myjob[n]].waitForCompletion()
ap=ap+incp
n=n+1
print n
mdb.jobs.changeKey(fromName=myjob[n-1], toName=myjob[n])
ae=ae+inc
print n

```